

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

LIDIJA NEGOVEC

ULOGA GIS-a U PRIPREMI ZAŠTITE PODZEMNIH
VODA U KRŠKIM VODONOSNICIMA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

ULOGA GIS-a U PRIPREMI ZAŠTITE PODZEMNIH
VODA U KRŠKIM VODONOSNICIMA

KANDIDAT:
Lidija Negovec

MENTOR:
Doc. dr. sc Hrvoje Meaški

VARAŽDIN, 2016.

SAŽETAK RADA

Kako bi se osigurali normalni uvjeti života današnjim i budućim generacijama potrebna je zaštita prirodno ranjivih vodnih resursa u krškim vodonosnicima. Prostorna analiza GIS alatima je važan element kod projekata zaštite krških vodonosnika u regionalnom pristupu zaštiti. Prostorna analiza za potrebe zaštite krških vodonosnika višeslojna je obrada pojedinih podloga GIS baze podataka. Te podloge čine podaci o geološkim i strukturno geološkim karakteristikama, hidrogeološki podaci, vegetacija i pedologija, karta onečišćivača (industrija, poljoprivreda) i dr. u koje su dodani hidrometeorološki podaci, satelitske snimke i snimke iz zraka, morfološki podaci. Preklapanjem pojedinih podloga dolazi se do tri osnovna "sloja": analiza prirodne ranjivosti terena, analiza opasnosti (hazarda), analiza rizika. Analiza procjene rizika rađena je preklapanjem „slojeva“ analize ranjivosti i analize opasnosti (hazarda) slično kao i u drugim multiparametarskim metodama.

KLJUČNE RIJEČI

krš, ranjivost vodonosnika, zaštita krških vodonosnika, GIS

Sadržaj

1	UVOD	1
2	OSNOVNE ZNAČAJKE KRŠKIH VODONOSNIKA	2
3	ZAŠTITA KRŠKIH VODONOSNIKA	6
3.1	Osnovne pretpostavke učinkovite zaštite	7
3.2	Primjeri zaštite krških vodonosnika u svijetu	8
3.2.1	Irska	8
3.2.2	Ujedinjeno Kraljevstvo (UK).....	15
3.2.3	Švicarska	20
3.3	Zaštita krških vodonosnika u Hrvatskoj	25
4	MOGUĆNOSTI PRIMJENE GIS-a	30
4.1	Osnovno o GIS-u.....	30
4.2	Mogućnosti primjene GIS-a povezane s vodnim resursima	31
4.3	Mogućnost primjene GIS-a u zaštiti krških vodonosnika	35
4.3.1	GIS kao alat za prikaz zaštitnih zona.....	35
4.3.2	GIS kao alat za modeliranje ranjivosti.....	36
5	POTREBNE PODLOGE ZA PRIMJENU GIS-a U ZAŠTITI KRŠKIH VODONOSNIKA	41
5.1	Zahtjevi GIS-a s obzirom na postojeću primjenu u zaštiti	41
5.2	Zahtjevi GIS-a s obzirom na buduću primjenu u zaštiti	42
5.2.1	Planiranje GIS projekta.....	42
5.2.2	Potrebne podloge	43
6	ZAKLJUČAK.....	49
7	LITERATURA	50
	POPIS SLIKA.....	56
	POPIS TABLICA	57

1 UVOD

Voda je jedinstveni prirodni kemijski spoj koji uvjetuje život na Zemlji. Njezin značaj za čovjeka je mnogostruk te se zbog toga može promatrati s različitih aspekata ljudske upotrebe. Međutim, najvažnija je činjenica da se koristi za piće i da je samim time nezamjenjiva u ljudskom tijelu. Porastom broja stanovnika i razvojem industrije potrebe za vodom svakodnevno rastu, čime se povećava i njeno iskorištavanje (crpljenje) iz podzemlja. Krški vodonosnici pritom predstavljaju vrlo vrijedne izvore podzemne vode, a vrlo često u nekim područjima i jedine zalihe vode za piće. Međutim, zbog svoje izuzetne osjetljivosti uvjetovane prirodnim karakteristikama, krški vodonosnici vrlo brzo reagiraju na moguća onečišćenja uzrokovana ljudskom djelatnošću. Zbog toga je često potrebna stroga zaštita takvih terena.

U današnje vrijeme su glavni izvori onečišćenja krških voda najčešće otpadne vode iz kućanstava i industrije, odlagališta otpada, prometnice i poljoprivredne aktivnosti (Almeida i sur., 1995). Zbog toga je zaštita podzemnih voda od onečišćenja ljudskom aktivnošću jedan je od osnovnih zadataka moderne hidrogeologije širom svijeta.

U ovom radu opisane su osnovne značajke krških terena, načini njihove zaštite potkrijepljeni primjerima zaštite u svijetu i u Republici Hrvatskoj. Navedene su i opisane mogućnosti primjene Geografskog informacijskog sustava (GIS) vezane za zaštitu krških vodonosnika. GIS je skup povezanih objekata i aktivnosti koji svojim međuodnosima služe pri donošenju odluka kod upravljanja nekim prostornim aktivnostima među kojima je i priprema zaštite podzemnih voda u krškim vodonosnicima.

2 OSNOVNE ZNAČAJKE KRŠKIH VODONOSNIKA

Pojam krša povezuje se s terenima specifičnog krajolika i morfoloških oblika, uglavnom razvijenih u karbonatnim stijenama. Krške forme nastale disolucijskim proširenjem pukotinskih sustava uglavnom su vezane uz topive stijene kao što su sol, anhidrit, gips i karbonati (vapnenac i dolomiti). Pritom je interakcija stijena-voda temeljni proces koji omogućuje proširenje rasjeda, pukotina i prslina u stijenama do dimenzija šupljina kroz koje se odvija dinamika u krškome podzemlju (B. Biondić i R. Biondić, 2014).

Generalno svi krški vodonosnici imaju trostruki porozitet: primarni (vrlo mali; 1-2 %), pukotinski (posljedica tektonike), pukotinsko-kavernozni (okršavanje; pojave krških kanala nastalih disolucijskim radom vode) (slika 1).

Primarna ili intergranularna poroznost nastala je za vrijeme taloženja stijena tj. za vrijeme njenog postanka te je tipična za aluvijalne vodonosnike. Pukotinska ili sekundarna poroznost posljedica je dijageneze ili tektonskih pokreta (rasjeda) stijena. Ono što je značajno i karakteristično za krške vodonosnike u odnosu na ostale pukotinske vodonosnike je tečenje podzemne vode kroz sustav kaverni i kanala koji čine tercijarnu ili pukotinsko-kavernoznu poroznost. Sekundarna i tercijarna poroznost su karakteristične za krške stijene (Ford i Williams, 2007).



Slika 1. Škocjanske jame, Slovenija (2014)

Razvoj perspektivnih krških vodonosnika moguć je jedino u karbonatima. Tri su glavna sastojka karbonatnih stijena aragonit, kalcit i dolomit. Aragonit je relativno čist kalcijev karbonat s vrlo malim sadržajem Mg, nestabilan je na površini terena i razmjerno se

brzo otapa ili transformira u kalcit. Kalcit je također kalcijev karbonat, no s većim sadržajem Mg od aragonita. Dolomit je mineral koji nastaje potiskivanjem CaCO_3 u vapnenačkim muljevima ili očvrslim vapnencima. U ovakvim stijenama je moguć razvoj krških vodonosnika koji zbog vrlo često velike poroznosti mogu biti i vrlo perspektivni rezervoari podzemne vode.

Prilikom procesa okršavanja dolazi do razvoja specifičnih površinskih, ali i podzemnih geomorfoloških obilježja:

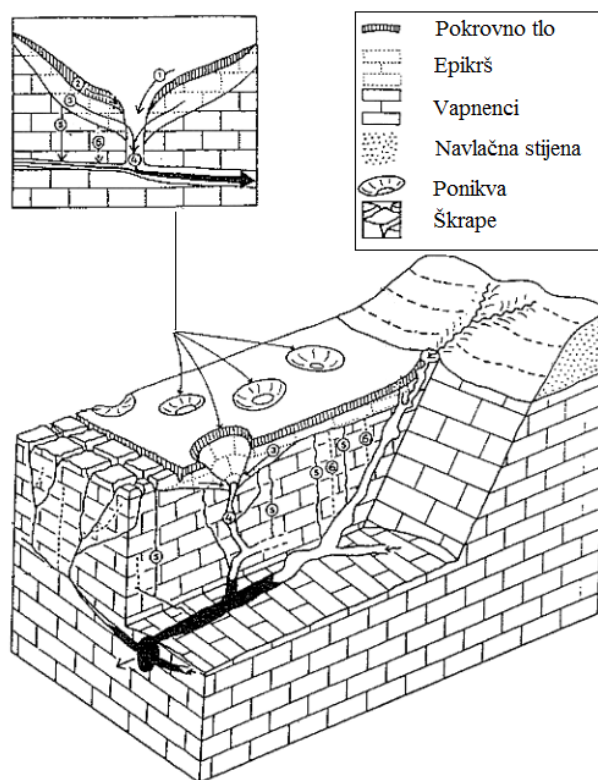
- opći nedostatak stalnih površinskih tokova uz postojanje ponora, krških polja i ostalih specifičnih krških forma
- česte pojave kaverna i podzemnih kanala
- postojanje velikih krških stalnih i povremenih izvora
- razvoj specifičnoga okoliša, obično vrlo oštih morfoloških oblika.

S obzirom da je ekstrapolacija podataka otežana, a u nekim slučajevima i nemoguća, hidrogeološka istraživanja su osnovna predispozicija za istraživanje zaštite podzemnih voda. Kod krških vodonosnika primarna istraživanja je potrebno usmjeriti na hidrogeološke odnose jer velika kompleksnost strukturne građe krških terena od istraživača zahtijeva dobro poznavanje i geologije i hidrodinamike. Zbog toga se hidrogeologija krša svrstava u jednu od najkompleksnijih geoloških znanstvenih disciplina.

Zbog specifičnosti krških morfoloških oblika i dinamike vode u krškim vodonosnicima, istraživanjima treba utvrditi individualne značajke svakog sustava, heterogenost i anizotropnost, različite načine napajanja vodom (difuzna i koncentrirana infiltracija), postojanje pokrovnih naslaga, epikrške zone i dr. (Meaški, 2011).

Osnovne karakteristike, koje čine krške vodonosnike visoko ranjivima su tanke i nekontinuirane pokrovne naslage, ponorne zone, jame, špilje, tokovi u epikrškim i nesaturiranim zonama vodonosnika, veliki krški izvori što rezultira relativno laganim prodorom onečišćenja u podzemlje i brzim transportom na velike udaljenosti. Zbog toga se promatrajući krške terene i način kretanja vode u njima generalno mogu proučavati uvjeti i načini infiltracije površinske vode u podzemlje te svojstva nesaturirane i saturirane zone krškog vodonosnika.

Infiltracija u krški vodonosnik može biti difuzna kroz pokrovno tlo i/ili koncentrirana kroz ponore i jame. Difuzna infiltracija je vezana za krška područja gdje nema izraženih zona poniranja. Koncentrirana infiltracija označuje područja otvorenih ponora i ponornih zona gdje se velike količine površinskih voda izravno infiltriraju u podzemlje.



Slika 2. Konceptualni model krškog područja (Gunn, 1986)

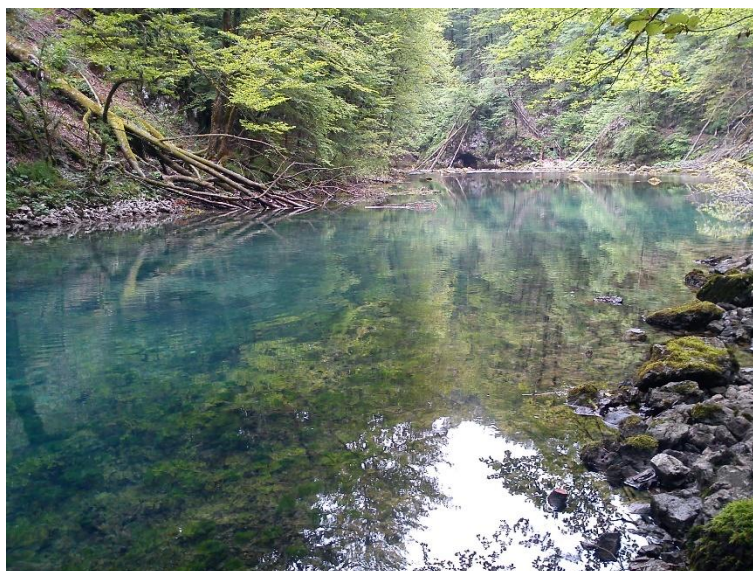
Pokrovno tlo nastaje trošenjem stijena na površini terena i biološki je vrlo aktivno. Sastoji se od minerala, organske tvari, vode, zraka i živih bića. Određena je zaštita krških vodonosnika od onečišćenja i pri ocjeni ugroženosti im se daje velik značaj. Njegova uloga u smanjenju onečišćenja ovisi o debljini, poroznosti i propusnosti pokrovnog tla (B. Biondić i R. Biondić, 2014).

Prilikom procesa infiltracije površinskih voda u podzemlje posebno treba računati i na funkciju **epikrške zone**. Epikrš je dio prostora krša s vrlo raspucanim, ali nerijetko i glinovitim taložinama djelomično ispunjenim pukotinskim strukturama. Ove strukture dijelom usporavaju uobičajene brze vertikalne tokove podzemnih voda te na taj način mogu i dominantno utjecati na režim tečenja podzemnih voda (Trček, 2003). U epikrškoj zoni se odvija i horizontalan tok vode te je u njoj moguća i akumulacija

onečišćenja. Zbog svega navedenoga je teško ocjenjiva zaštitna funkcija epikrške zone. Ona sigurno postoji, ali u različitim prirodnim uvjetima ona može biti pozitivna ili negativna.

Krški slivovi unutar kojih se formiraju vodonosnici mogu biti ekstremno velikih dimenzija (ponekad i preko 1000 km²) i hidraulički povezani na velike udaljenosti zbog čega je teško odrediti razvodnice, ovisne o hidrološkim uvjetima i često dolazi do preklapanja sustava podzemnih tokova (B. Biondić i R. Biondić, 2014).

Karbonatni vodonosnici su okršeni s velikim šupljinama u podzemlju i brzim tokovima podzemne vode, koji ponekad dostižu i preko 30 cm/s. Podložni su brzom i jakom hidrauličkom reakciji na hidrološke događaje pa vrlo često dolazi do pojave velikih krških izvora koji ustvari predstavljaju završetak podzemnog toka (slika 3).



Slika 3. Izvor Kupe

Nadmorska visina izvora uvjetuje razinu podzemne vode u krškom vodonosniku, dok hidraulička vodljivost i količina istjecanja uvjetuju nagib vodnog lica. Jedna od također vrlo bitnih karakteristika izvora u krškim vodonosnicima je činjenica da oni mogu biti stalni ili povremeni. s tim da i kod stalnih krških izvora izdašnost može pasti na svega nekoliko litara u sekundi. Također, i kod jednih i kod drugih maksimalna izdašnost može biti nekoliko stotina m³/s.

3 ZAŠTITA KRŠKIH VODONOSNIKA

Zaštita vodnih resursa jedna je od najvažnijih znanstvenih i stručnih aktivnosti u svijetu. Svaka država provodi zaštitu voda sukladno svojoj legislativi, međutim sprječavanje onečišćenja podzemne vode trebala bi biti briga svakog čovjeka. Podzemna voda napaja potoke, jezera, bare, rijeke i močvare, a aktivnosti čovjeka mogu onečistiti podzemnu vodu koja daljnjim kretanjem može dospjeti na velike udaljenosti i izlaziti na izvorima koji služe za vodoopskrbu nekog područja. Zbog toga što se u krškim područjima brzo mijenja koncentracija tokova u podzemlju, podzemna voda je vrlo osjetljiva na onečišćenje, stoga ljudi koji žive na tim prostorima moraju biti posebno oprezni da njihova aktivnost ne utječe na kvalitetu podzemne vode (ky.gov, 2016).

Danas se na razini država članica Europske unije nastoji provoditi zajedničko djelovanje u različitim područjima ljudske djelatnosti pa tako i u segmentu upravljanja i zaštite voda. Okvirne smjernice se propisuju različitim direktivama kao i popratnim dokumentima. Neke od europskih direktiva povezanih s vodama i njihovom zaštitom jesu:

- Water Framework Directive (Okvirna direktiva o vodama, ODV) (2000/60/EC);
- Groundwater Directive (Direktiva o podzemnim vodama, DPV) (2006/118/EC);
- Drinking Water Directive (80/778/EEC) s izmjenama i dopunama Directive (98/83/EC);
- Major Accidents (Seveso) Directive (96/82/EC);
- Environmental Impact Assessment Directive (85/337/EEC);
- Sewage Sludge Directive (86/278/EEC);
- Urban Waste-water Treatment Directive (91/271/EEC);
- Nitrates Directive (91/676/EEC);
- Habitats Directive (92/43/EEC);
- Integrated Pollution Prevention Control Directive (96/61/EC);
- Bathing Water Directive (2006/7/EC);
- Floods Directive (2007/56/EC);
- Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC).

U segmentu upravljanja i zaštite voda je najvažnija Okvirna direktiva o vodama (ODV, 2000/60/EC) čiji je osnovni cilj sprječavanje daljnje degradacije voda i osiguravanje

progresivnog smanjenja onečišćenja podzemnih voda, sprječavanje njihovog daljnjeg onečišćenja, zaštita i poboljšanje stanja vodenih ekosustava i uspostava sustava održivog korištenja voda temeljeno na dugoročnoj zaštiti vodnih resursa.

3.1 Osnovne pretpostavke učinkovite zaštite

Mnogi čimbenici mogu utjecati na učinkovitost propisane zaštite podzemnih voda, posebice u krškim vodonosnicima, ali u osnovi se mogu objediniti u tri osnovne skupine koje su ukratko objašnjene u nastavku: karakterizacija resursa podzemne vode, prostorno planiranje te neposredna zaštita izvorišta i vodnih resursa (GWPC, 2007).

Karakterizacija resursa podzemne vode podrazumijeva karakterizaciju i monitoring podzemnih voda te izradu sveobuhvatnih i dosljednih baza podataka o podzemnim vodama kako bi se što realnije opisalo postojeće stanje, identificiralo postojeće i potencijalne probleme te uspostavilo prioritete vezane za održiv razvoj vodnih politika i strategija. Osnovni problemi kod karakterizacije resursa podzemne vode vrlo često su povezani upravo s nedostatkom dugoročne održive podrške kao i nedostatkom sredstva potrebnih za prikupljanje podataka o kvaliteti i kvantiteti podzemnih voda kako bi se mogle napraviti potrebne analize, istraživanje trendova, te diseminacija dobivenih informacija. Nadalje, kod aktivnosti vezanih za upravljanje vodama često se zanemaruje činjenica da su površinske i podzemne vode u mnogim slučajevima hidraulički povezane. Mnogo je teže pratiti kvalitetu (uzorkovanje je kompliciranije), kvantitetu i gibanje podzemne vode u podzemnim vodonosnicima nego u površinskim tokovima. Kako bi se ti problemi riješili potrebno je provoditi integralno upravljanje pripadajućim slivom bazirano na odgovarajućim vodonosniku, povezati međudjelovanje površinskih i podzemnih vodnih resursa, provesti hidrogeološka kartiranja i razviti mrežu opažanja podzemnih voda.

Zaštita izvorišta i vodnih resursa podrazumijeva identifikaciju potencijalnih izvora onečišćenja, otklanjanje prijetnji i primjenu najbolje prakse u upravljanju podzemnim vodama pri čemu se mora pažljivo odrediti područje prihranjivanja. Osnovni problemi su ranjivost izvora pitke vode na antropogeno onečišćenje. Troškovi remedijacije su daleko veći od cijene zaštite voda. Javni vodovodi ponekad jednostavno nemaju kontrolu nad različitim, za vodu potencijalno opasnim zahvatima u okolišu stoga je

glavni izazov u zaštiti podzemnih voda osigurati da i javni i privatni sektor uvidi nužnost zaštite podzemnih vodnih resursa te da ih uzme u obzir u prostornim i razvojnim planovima. Uobičajena rješenja su delineacija zaštitnih zona izvorišta/vodonosnika za sve izvorišta javne vodoopskrbe, popisivanje svih mogućih potencijalnih izvora onečišćenja u svakoj izdvojenoj zoni zaštite, te određivanje osjetljivosti svakog vodoopskrbnog izvora na pojedine izvore onečišćenja.

Prostorno planiranje obuhvaća osiguravanje dovoljnih količina kvalitetne vode za potrebe različitih korisnika kao i za gospodarski razvoj. Međutim, prenamjena zemljišta može utjecati na promjenu hidroloških uvjeta te potencijalno izravno ili neizravno utjecati na količinu ili kvalitetu podzemnih i površinskih voda. Jedan od najočitijih primjer je promjena određenih komponenti hidrološkog ciklusa (količine oborina, infiltracije, otjecanja) čime se povećava rizik smanjenja ili gubitka vodnih resursa tijekom vremena. Javne agencije i istraživačke institucije koje prikupljaju i analiziraju podatke vezane uz vodu trebale bi zbog toga redovito objavljivati materijale i rezultate svojih istraživanja.

Što se tiče prostornog planiranja, ono mora uzeti u obzir lokaciju, kvalitetu, izdašnost, ranjivost, kao i mogućnost prihranjivanja pojedinih vodonosnika te u skladu s tim dugoročno predvidjeti dostupnost vode na nekom području. Međutim, osnovni problem kod prostornog planiranja je taj da dugoročna održivost ovisi o razvoju investicija (razvojno planiranje), a one ovise o dostupnosti i kvaliteti vode na nekom području. Zbog toga se može ugroziti i osnovi cilj – zaštita podzemne vode kao prirodnog resursa neophodnog za razvoj neke zajednice. Pritom može pomoći revizija prostornih planova koja podrazumijeva profesionalnu i tehničku reviziju kojom bi se osigurala zaštita podzemnih voda. Ovim načinom vodni resursi ne bi bili ugroženi te bi se osiguralo donošenje najpovoljnijih rješenja za svaku lokaciju zasebno.

3.2 Primjeri zaštite krških vodonosnika u svijetu

3.2.1 Irska

Republika Irska je otočna država smještena u zapadnoj Europi. Kao i većina zemalja smještenih uz Atlantik, i Irska je poznata po kišnom vremenu i blagoj klimi. Dio kiše

koja pada na tlo se infiltrira u podzemlje, plitko tlo i stijene, te postaje podzemna voda. Većina podzemnih voda polako se kreće kroz podzemlje i ostaje tamo vrlo dugo, prije nego što izađe na površinu, kao dio osnovnog toka rijeka ili na izvorima. Dio ove vode koristi se za piće, posebice za pojedinačna kućanstva u agrarnim područjima, a često se slabo ili nikako ne tretira prije upotrebe (EPA, 2016).

Podzemna voda u Irskoj je značajan prirodni resurs i osigurava oko 20 do 25 % vodoopskrbe za stanovništvo. U pojedinim irskim grofovijama taj je postotak znatno veći te iznosi i do 50 %. U ruralnim predjelima u kojima nema javne vodoopskrbe, podzemna voda je jedini izvor vode za potrebe kućanstava. Smatra se da se u tu svrhu koristi između 100.000 i 200.000 bunara, pri čemu se svake godine buši i nekoliko stotina novih (DELG/EPA/GSI, 1999).

Veliki postotak vodonosnika u Irskoj čine karbonatne stijene, među kojima dominiraju vapnenci. Zbog toga većina rezervi podzemnih voda u Irskoj ima veliku ranjivost (EPA, 2008). U vodonosnicima veće prirodne ranjivosti postoji problem mikrobiološkog onečišćenja. Ovi vodonosnici slabo su prirodno zaštićeni od organskog onečišćenja, kao što su efluenti iz septičkih jama te životinjskih farmi, jer se iznad njih nalazi pokrovno tlo male debljine.

U Irskoj postoji stalna težnja za napretkom u području zaštite podzemnih voda, posebice u svrhu ostvarivanja ciljeva Okvirne direktive o vodama, odnosno postizanja dobrog stanja voda. Za razliku od većine drugih zemalja EU, vodonosnici u čvrstim stijenama imaju samo pukotinsku poroznost (EPA, 2016).

U Irskoj su tri osnovna dokumenta (Pravilnika) vezana za zaštitu podzemnih voda: *Water Policy Regulations*, *(Groundwater) Regulations* te *Groundwater Protection Schemes*.

Kao članica EU, Republika Irska je prihvatila i implementirala u svoje zakonodavstvo sve direktive EU vezane uz problematiku voda. **Water Policy Regulations** implementira ODV EU te uspostavlja sedam vodnih područja na području Irske (River Basin Districts), od kojih se tri odnose na prekogranična slivna područja povezana sa Sjevernom Irskom koja je u sastavu Ujedinjenog Kraljevstva. Za svako vodno područje vlasti bi trebale zajednički djelovati te uspostaviti ciljeve zaštite okoliša i programe

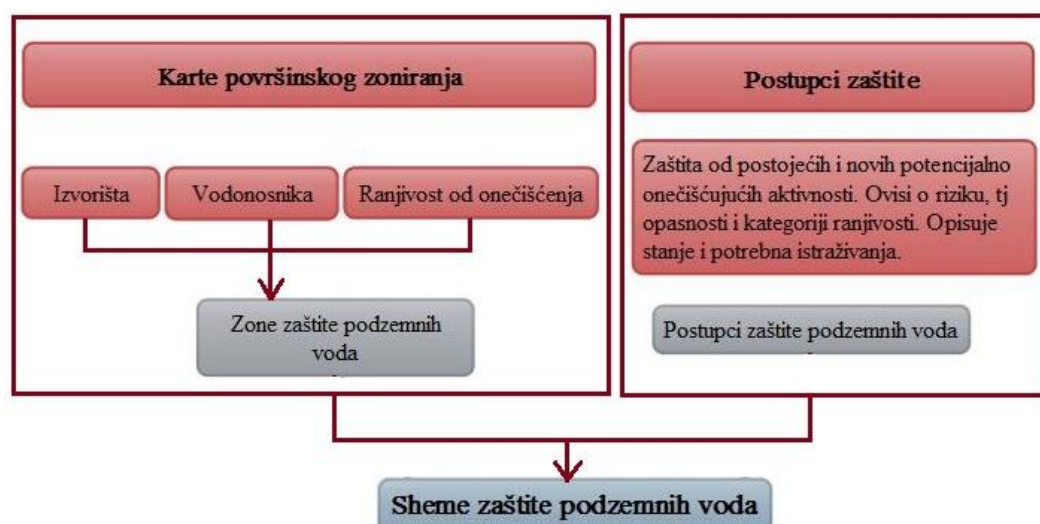
mjera za postizanje tih ciljeva te definirati savjetodavna vijeća za svako slivno područje. Ovim se dokumentom osigurava i koordinacija te daju smjernice na nacionalnoj razini od strane ministarstva nadležnog za vode (*Department of Communications, Energy and Natural Resources*) i Environmental Protection Agency (EPA). Neke od dužnosti nadležnih tijela Pravilnika su poduzimanje mjera sa svrhom provedbe ODV ili Pravilnika, suradnja i povezivanje s drugim nadležnim tijelima, uključujući i tijela Sjeverne Irske s ciljem zaštite i razvoja pojedinog vodnog područja provođenjem analiza karakteristika sliva, pregleda utjecaja ljudskih aktivnosti na površinske i podzemne vode, monitoring kakvoće voda, priprema planova upravljanja i njihova implementacija s mjerama zaštite i dr. (Iris Oifigiúil, 722/2003).

Propisi obuhvaćeni s **(Groundwater) Regulations** donose mjere za postizanje ciljeva zaštite podzemnih voda koji su definirani Direktivama. Mjere se odnose na: sprječavanje ili ograničavanje unošenja onečišćujućih tvari u podzemne vode, zaštitu, poboljšanje i obnovu svih vodnih tijela podzemnih voda i osiguravanje ravnoteže između crpljenja i prihranjivanja podzemnih voda, zahtijevaju smanjivanje svakog značajnog trenda rasta koncentracija štetnih tvari uslijed utjecaja antropogenih djelatnosti, mjere za određivanje količina podzemnih voda i utvrđivanje kriterija i postupaka za procjenu kemijskog stanja podzemnih voda te mjere za propisivanje pravila za prezentaciju i izvješćivanje o rezultatima monitoringa podzemnih voda, procjenu trendova i klasifikaciju kvantitativnog i kemijskog stanja podzemnih voda. Prema Pravilniku (Groundwater) Regulations, EPA je dužna izrađivati karte kvantitativnog i kemijskog stanja podzemnih voda. Na kartama se mora različitim bojama naznačiti u kakvom su stanju podzemne vode: dobro stanje zelenom bojom, loše stanje crvenom bojom, crnim točkama se označavaju vodna tijela podzemne vode koja su podložna značajnim rastućim trendovima koncentracije onečišćivala podrijetlom od ljudskih djelatnosti, dok se plavim točkama označava smanjivanje trenda (Iris Oifigiúil, 9/2010).

Groundwater Protection Schemes objedinjene su u dokumentu *Groundwater Protection Schemes Guidelines* (DELG/EPA/GSI, 1999). Izrada sheme zaštite podzemnih voda se radi na razini grofovija, od GSI (Geological Survey of Ireland) i lokalnih vlasti.

GSI je nacionalna agencija za geoznanosti, osnovana 1845. godine, a odgovorna je za osiguravanje geoloških savjeta i informacija te prikupljanje podataka u tu svrhu. Njezino područje djelovanja uključuje i podzemne vode. GSI izdaje čitav niz proizvoda: karte, izvješća i baze podataka te djeluje kao centar znanja i projektni partner u svim područjima geologije Irske (DELG/EPA/GSI, 1999).

Sheme zaštite podzemnih voda (Slika 4) pružaju nadležnim tijelima smjernice za planiranje i upravljanje te čine osnovni okvir pri donošenju odluka na određenim lokacijama, kod kontrole razvoja i različitih aktivnosti. Opći cilj programa i shema za zaštitu podzemnih voda je očuvanje kvalitete podzemnih voda, posebice one koja se koristi za piće, za dobrobit sadašnjih i budućih generacija. Od 2003. godine, ministarstvo nadležno za zaštitu okoliša (*Department of Environment, Heritage and Local Government*) predlaže da se sheme uključe u razvojne planove grofovija.

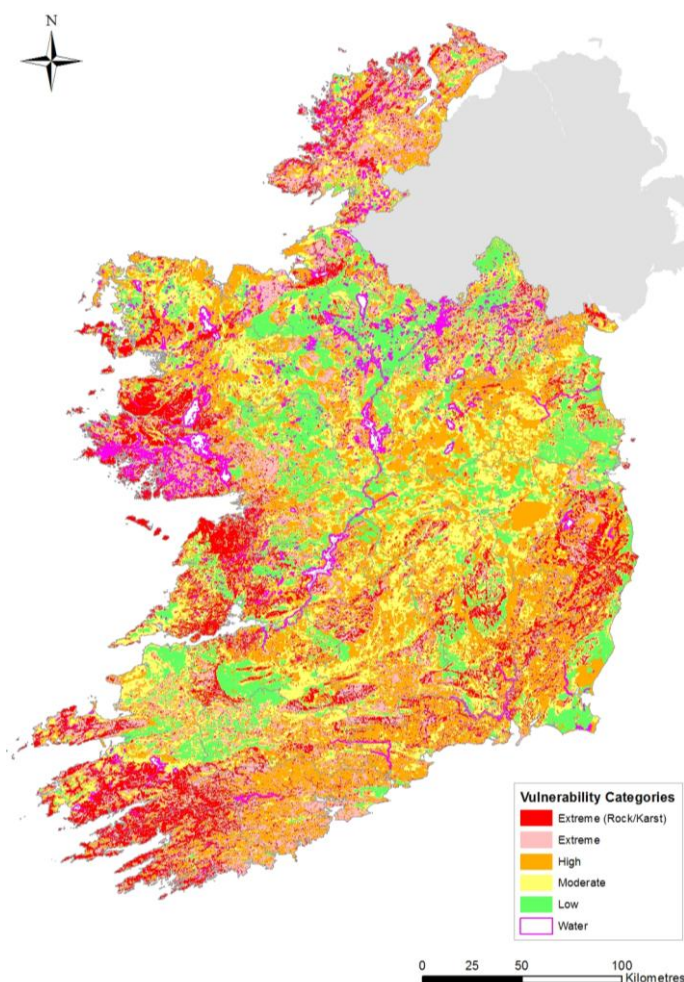


Slika 4. Shema zaštite podzemnih voda (DELG/EPA/GSI, 1999)

Sheme sadrže dvije osnovne komponente: karte površinskog zoniranja koje se nazivaju zonama zaštite podzemnih voda te postupke zaštite podzemnih voda u svrhu zaštite od postojećih i novih potencijalno onečišćujućih aktivnosti.

Uloga GSI je izrada karata zaštitnih zona, dok odluke o postupcima zaštite podzemnih voda donose nadležne vlasti. Rizik za podzemne vode definira se kroz procjenu ranjivosti vodonosnika (slika 5), izdašnosti vodonosnika i područja zaštite izvorišta. Ovi podaci zajednički se koriste za definiranje zaštitnih zona vodonosnika. Svaka zona ima određeni kôd (npr. Rf/H) koji omogućuje procjenu rizika za podzemne vode, neovisno o

vrsti opasnosti ili tipu onečišćenja. Na taj način je omogućena ocjena prikladnosti određenih postupaka prije samog izlaska na teren (DELG/EPA/GSI, 1999).



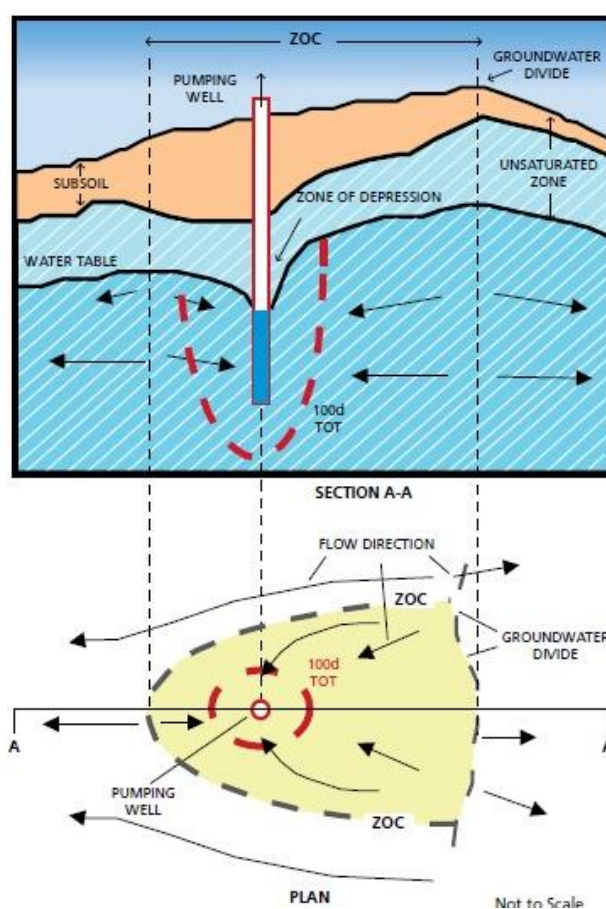
Slika 5. Karta ranjivosti vodonosnika u Republici Irskoj (DCCAE, 2014)

U tablicama 1 i 2 su prikazane matrice koje se koriste za utvrđivanje kôdova vezanih za zone zaštite vodonosnika i zone zaštite izvorišta (DELG/EPA/GSI, 1999).

Tablica 1. Matrica za utvrđivanje zaštitnih zona izvorišta (DELG/EPA/GSI, 1999)

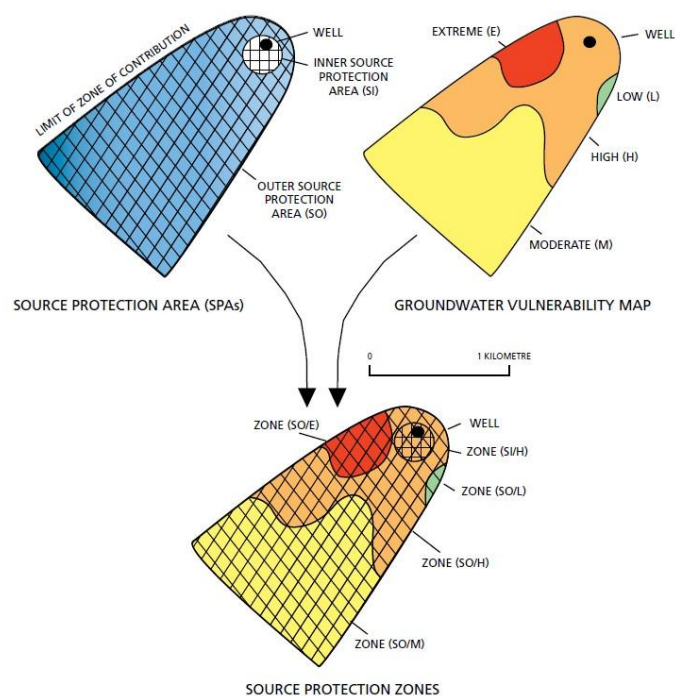
OCJENA RANJIVOSTI	ZAŠTITNE ZONE IZVORIŠTA	
	Unutrašnja (SI)	Vanjska (SO)
Ekstremna (E)	SI/E	SO/E
Visoka (H)	SI/H	SO/H
Umjerena (M)	SI/M	SO/M
Niska (L)	SI/L	SO/L

Kod zahvaćanja podzemne vode iz zdenca crpljenjem, oko zdenca se definira zona utjecaja (Zone of Contribution, ZoC). ZoC obuhvaća područje koje okružuje crpni zdenac, odnosno područje koje opskrbljuje zdenac podzemnom vodom (Slika 6). ZoC se definira na području dugotrajnog prihranjivanja podzemnih voda. Ova zona trebala bi se definirati za svaki izvor vode koja se koristi za piće, a da bi se mogla definirati potrebno je posjedovati informacije o količini crpljenja (uključujući faktor sigurnosti), ocjenu količine prihranjivanja te smjer toka podzemne vode. Zone utjecaja oko izvora podzemne vode mogu se definirati kao zaštitne zone izvorišta (Source Protection Zone, SPZ) s unutrašnjim (SI) i vanjskim (SO) područjem zaštite (Tablica 1.).



Slika 6. Prikaz zone utjecaja (Zone of Contribution-ZoC) (US EPA, 1987)

Granica tog područja je granica ZoC (Slika 7.). SI područje određuje se u svrhu zaštite izvorišta od antropogenih djelatnosti koje mogu izravno utjecati na izvor, a posebice na mikrobiološko onečišćenje. Definirana je 100-dnevnim vremenom dotoka, odnosno onom udaljenosti od izvora od koje je vrijeme dotoka podzemne vode 100 dana. SO područje pokriva ostatak zone doprinosa.



Slika 7. Definiranje zaštitnih zona izvorišta (DELG/EPA/GSI, 1999)

Nadalje, za svaku regiju, područje izvan SPZ-a može se podijeliti s obzirom na važnost vodonosnika i njegove hidrogeološke značajke na 8 tipova vodonosnika prema kojima se određuju zaštitne zone vodonosnika (Resource Protection Zones- RPZ). To su vodonosnici regionalne važnosti (R), vodonosnici lokalne važnosti (L) i vodonosnici siromašni vodom (P). Svaki tip vodonosnika ima svoj kôd.

- Vodonosnike regionalne važnosti čine okršeni vodonosnici (Rk), pukotinski vodonosnici (Rf) te vodonosnici međuzrnske poroznosti (pijesak, šljunak) (Rg).
- Vodonosnike lokalne važnosti čine vodonosnici međuzrnske poroznosti (pijesak, šljunak) (Lg), vodonosnici u čvrstim stijenama s generalno srednjom izdašnošću (Lm) te vodonosnici u čvrstim stijenama sa srednjom izdašnošću na određenim mjestima (LI).
- Vodonosnike siromašne vodom čine generalno vodonosnici u čvrstim stijenama s malom količinom vode i lokaliziranim zonama veće izdašnosti (PI) te vodonosnici u čvrstim stijenama s malim količinama vode (Pu).

Navedeni vodonosnici prikazuju se na karti i služe pri određivanju zaštitnih zona i upravljanju podzemnim vodama. Integracijom dva elementa površinskog zoniranja

(kategorije ranjivosti i tipa vodonosnika) dobivaju se 24 zone zaštite vodonosnika prikazane u tablici 2.

Tablica 2. Matrica za utvrđivanje zaštitnih zona vodonosnika (DELG/EPA/GSI, 1999)

OCJENA RANJIVOSTI	ZAŠTITNE ZONE					
	Vodonosnici regionalne važnosti (R)		Vodonosnici lokalne važnosti (L)		Vodonosnici slabe izdašnosti (P)	
	Rk	Rf/Rg	Lm/Lg	Ll	Pl	Pu
Ekstremna (E)	Rk/E	Rf/E	Lm/E	Ll/E	Pl/E	Pu/E
Visoka (H)	Rk/H	Rf/H	Lm/H	Ll/H	Pl/H	Pu/H
Umjerena (M)	Rk/M	Rf/M	Lm/M	Ll/M	Pl/M	Pu/M
Niska (L)	Rk/L	Rf/L	Lm/L	Ll/L	Pl/L	Pu/L

U praksi se to radi preklapanjem karte ranjivosti i karte vodonosnika. Kod površinskog zoniranja zaštite podzemnih voda, Rf i Rg vodonosnici kao i Lm i Lg se zoniraju zajedno (DELG/EPA/GSI, 1999).

3.2.2 Ujedinjeno Kraljevstvo (UK)

Ujedinjeno Kraljevstvo je otočna država smještena na sjeverozapadnoj obali kontinentalne Europe, okružena Sjevernim morem, Engleskim kanalom i Atlantskim oceanom. Ujedinjeno Kraljevstvo obuhvaća države smještene na Britanskom otoku: Englesku, Wales, Škotsku, te Sjevernu Irsku koja se nalazi na Irskom otoku.

Podzemna voda je izvor pitke vode za milijune ljudi u UK. Prihranjuje rijeke i močvare te omogućava život biljnom i životinjskom svijetu koji se nalazi tom području. Međutim, podzemna voda, zbog sve veće potrebe za vodom, onečišćenja i klimatskih promjena postaje sve više ugrožena. Onečišćenje nitratima u vodonosnicima krede i pješčenjaka povezano je s dugogodišnjim poljoprivrednim aktivnostima. S ciljem zaštite voda osnovane su brojne organizacije i institucije za sprječavanje daljnje degradacije i onečišćenja vodonosnika (UK Groundwater Forum, 2016).

Dvije ključne organizacije u UK za upravljanje vodama su DEFRA (*Department for Food and Rural Affairs*) i Agencija za okoliš (*Environment Agency* (EA)). DEFRA je odjel vlade koji izvorno radi u Engleskoj, ali surađuje s upravama u Walesu, Škotskoj i

Sjevernoj Irskoj. Zadužena je za razvoj politike i zakonodavstva. EA je dužna državu obavještavati o stanju okoliša, hrane i ruralnim pitanjima. Najvažniji cilj organizacije je zaštita i razvoj okoliša uz koncept održivog razvoja.

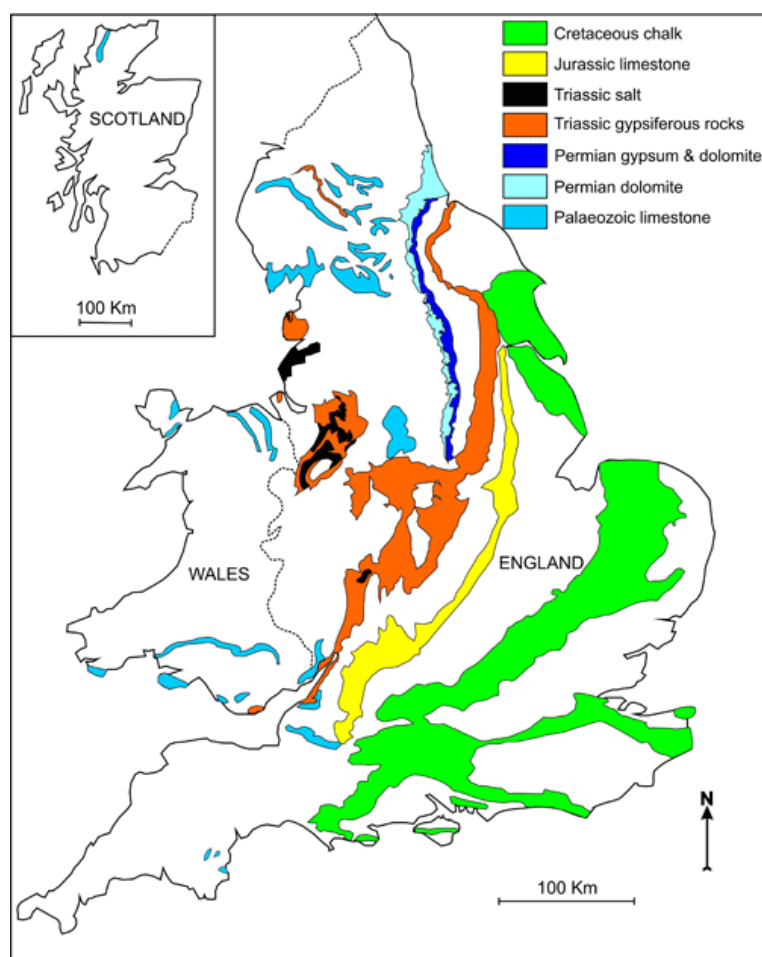
Zakonom o vodama iz 2003. godine (*Water Act, 2003*), propisi iz Okvirne direktive o vodama preneseni su u zakonodavstvo Engleske, Walesa, Škotske i Sjeverne Irske. Na taj je način najvažniji propis koji se tiče zaštite vode u Europskoj uniji (ODV, 2000) prenesen i u zakonodavstvo UK (Salazar, 2011). ODV je dopunjena s Direktivom o podzemnim vodama kako bi se utvrdila kvaliteta vode i uvele mjere za sprječavanje ili ograničenje unošenja onečišćujućih tvari u podzemne vode i Direktivom o kakvoći vode gdje se ograničavaju koncentracije nekih tvari u površinskim vodama. Osim navedenih, primjenjuju se još i Direktiva o vodi za piće, Direktiva o nitratima, Direktiva o otpadnim vodama i Direktiva o vodi za kupanje.

Prva od mjera zaštite je kartiranje područja gdje je podzemna voda najranjivija i zatim korištenje tih podataka prilikom prostornog planiranja (UK Groundwater Forum, 2016). Za područje Engleske i Walesa napravljene su 53 karte koje prekrivaju cijelo područje. Za Škotsku i Sjevernu Irsku također su dostupne takve karte (EA UK, 2009). Označena su područja gdje se crpi voda za javnu vodoopskrbu te aktivnosti koje bi mogle prouzročiti onečišćenje. Ta područja se zovu Zone zaštite izvorišta. Također se provode posebne mjere za kontrolu onečišćenja vode nitratima i kontrolu poljoprivredne djelatnosti (UK Groundwater Forum, 2016 i EA UK, 2009). U blizini industrija i odlagališta koja mogu predstavljati opasnost reguliraju se aktivnosti kako bi se smanjio rizik od onečišćenja i napravljene su bušotine gdje se prate određeni parametri kako bi se onečišćenje otkrilo na vrijeme. Ako dođe do onečišćenja postoje metode kojima se ta voda tretira kako bi se poboljšalo njezino stanje i ispravnost vode (UK Groundwater Forum, 2016).

Kako bi se zaštitile podzemne vode, EA u Engleskoj i Walesu definirala je različite tipove vodonosnika. Definirani su primarni vodonosnici, sekundarni vodonosnici te ostatak koji je proglašen neproduktivnim slojem. Primarne vodonosnike čine čvrste ili sedimentne stijene koje imaju veliku intergranularnu i /ili pukotinsku poroznost. Obično imaju veći koeficijent uskladištenja pa mogu prihranjivati rijeke ili se koristiti za vodoopskrbu. Sekundarne vodonosnike čini niz geoloških slojeva koji imaju različite

propusnosti i koeficijent uskladištenja. Ovisno kako su ti slojevi stratificirani, dijele se na propusne formacije koje primaju male do umjerene zalihe pitke vode te bazni tok rijeka i na formacije s generalno niskom propusnošću s pojavom izvora. Vodonosnici su definirani u skladu s ODV (BGS, 2016). Definirani vodonosnici označavaju vodonosnike koji su bitni izvori podzemne vode, ali isto tako su bitni i za održavanja ravnoteže površinskih vodonosnika.

Osnovne vrste krških stijena u UK su vapnenci, kalk (kreda), sol i gips (slika 8). U vapnencima nastaju najbolje razvijeni krški tereni i najduži špiljski sustavi. Nalaze se na području Mendip planine, Doline Yorkshira i Derbyshire Peak Distrikta (Nacionalni Park).



Slika 8. Prikaz krških područja u UK (BGS, 2016)

Kalk je vrlo prepoznatljiv čisti oblik vapnenca te je najraširenija karbonatna stijena u UK. Javlja se u većem dijelu južne i istočne Engleske te je od izuzetne važnosti za vodoopskrbu. Disolucijskim radom stvara proširene pukotine i kanale koji potencijalno

moгу uzrokovati probleme za vodoopskrbu (vodonosnik se vrlo brzo onečišti zbog velikih brzina tokova). Gips je prisutan uglavnom u permskim stijenama istočne i sjeverno-istočne Engleske, osobito oko Ripona i Darlingtona te u dolini Edena. Karakteristike takvih terena su brzo razvijanje krških formi, zbog čega dolazi do aktivnog slijeganja (grad Ripon) što otežava uvjete za planiranje i razvoj. Sol (halit ili natrijev klorid) se javlja uglavnom u stijenama perma i trijasa srednje i sjeveroistočne Engleske (BGS, 2016).

U UK je definirano 2000 zona zaštite izvora podzemnih voda koji se koriste za opskrbu stanovništva pitkom vodom. Zone pokazuju stupnjeve rizika od onečišćenja koja bi se mogla dogoditi. Što je aktivnost koja može uzrokovati onečišćenje bliža i sami rizik za određeni izvor je veći. Tri su glavne zone zaštite te četvrta zona ili zona posebnog interesa, koja se povremeno primjenjuje. Tri glavne zone su unutarnja, vanjska i slivno područje. Zone se definiraju u skladu s Pravilnikom i postavljaju se mjere za prevenciju onečišćenja u područjima visokog rizika i za praćenje onečišćenja od potencijalnih onečišćivača (EA UK, 2009).

Veličina i oblik zone zaštite izvorišta definira se ovisno o nekim čimbenicima kao što su: postotak raširenosti podzemne vode, prihranjivanje (izravno i neizravno), propusnost vodonosnika (hidraulička vodljivost), efektivna poroznost, debljina vodonosnika, hidraulički gradijent i smjer tečenja podzemne vode (EA UK, 2009).

Zone zaštite izvorišta krških vodonosnika

Groundwater protection: Principles and practice (GP3) je dokument koji EA koristi kao smjernice pri zaštiti i upravljanju podzemnim vodama. GP3 daje osnovna načela kod definiranja zona zaštite izvorišta.

Za kartiranje potencijalnog rizika od onečišćenja vodonosnika koristi dvije metode:

- određivanje ranjivosti vodonosnika
- određivanje zona zaštite izvorišta (SPZ - Source protection zone).

Metodologija delineacije SPZ u kršu

Delineacija SPZ prevladava u krškim vodonosnicima i uglavnom se temelji na terenskim istraživanjima (trasiranja) i odgovarajućim proračunima.

Pritom vrijedi:

- SPZ ne obuhvaća područje koje je definirano kao područje koje ne prihranjuje vodonosnik
- SPZ obuhvaća područje izvan ruba definiranog vodonosnika ali koje napaja izvor vodom.

Ukratko, metoda uključuje sljedeće korake:

- prikupljanje podataka, uključujući i rezultate trasiranja
- terenska ispitivanja svakog izvora i njegovog mogućeg slivnog područja za procjenu važnosti aktivnih i presušenih izvora, vodotoka te topografskih i geoloških značajki
- razvoj konceptualnog modela slivnog područja pojedinog izvora na temelju ponašanja izvora/bušotine, krških obilježja, broja vrtača, itd.
- određivanje područja prihranjivanja koristeći proračune vodne bilance (to su minimalni zahtjevi jer trasiranja mogu pokazati puno veća područja prihranjivanja od onog dobivenog na temelju izračunate vodne bilance te zbog sezonskog mijenjanja karakteristika sliva pa je kod određivanja zone prihranjivanja i to potrebno uzeti u obzir);
- definirati granice zone prihranjivanja na temelju: izračunatog područja prihranjivanja, geoloških i hidrogeoloških granica, rezultata trasiranja, incidentnih situacija, kartiranja podzemnih špiljskih sustava;
- definiranje Unutarnje zone izvorišta na temelju rezultata trasiranja, drugih podataka o incidentnim onečišćenjima, razumijevanje ponašanja površinskih voda u slivu i njihova interakcija s podzemnim vodama, kao npr. mjesta poniranja toka koji napaja izvor
- definiranje zone od 400 dana i zone sliva
- definiranje alohtonog dijela sliva
- identificiranje područja koja se mogu isključiti iz SPZ-a (npr. područja s nepropusnim pokrovnim naslagama)
- definiranje predloženih granice SPZ-a i pregled istih baziranih na konceptualnom razumijevanju lokalnog i regionalnog toka podzemne vode
- finalizacija granica zona zaštita izvorišta, SPZ
- evidentiranje podataka sliva za konačno utvrđivanje SPZ (GIS analize).

Glavni izvori podataka su licencirane datoteke, geološke i hidrogeološke karte, lokalno znanje o području, povijesni podaci (npr. podaci speleoloških udruga, lokalni arhivi) i rezultati trasiranja. Lokalno znanje bi se trebalo provjeriti pomoću drugih nezavisnih izvora (ako ih ima) kako bi se izbjegao sukob. Povijesni izvori se provjeravaju na terenu kod samog izvora kako bi se osigurala njihova pouzdanost. Ključni podaci kod određivanja zona zaštite su informacije o krškim obilježjima, izdašnost izvora, variranje razine i toka podzemne vode.

Trasiranja daju najbolje rezultate pri definiranju unutrašnje zone zaštite izvorišta. Podaci o trasiranjima su dostupni na Sveučilištima, lokalnim arhivima, Britanskom geološkom institutu (BGS), *Water Resource Centre* (WRc), EA i dr..

Kada se zona definira poznati su podaci o podzemnoj vodi, njezinoj ranjivosti i stupnju rizika od onečišćenja podzemne vode. Također su poznati podaci o tome kako će se ta voda moći crpiti i koje propise je potrebno zadovoljiti (EA UK, 2009).

3.2.3 Švicarska

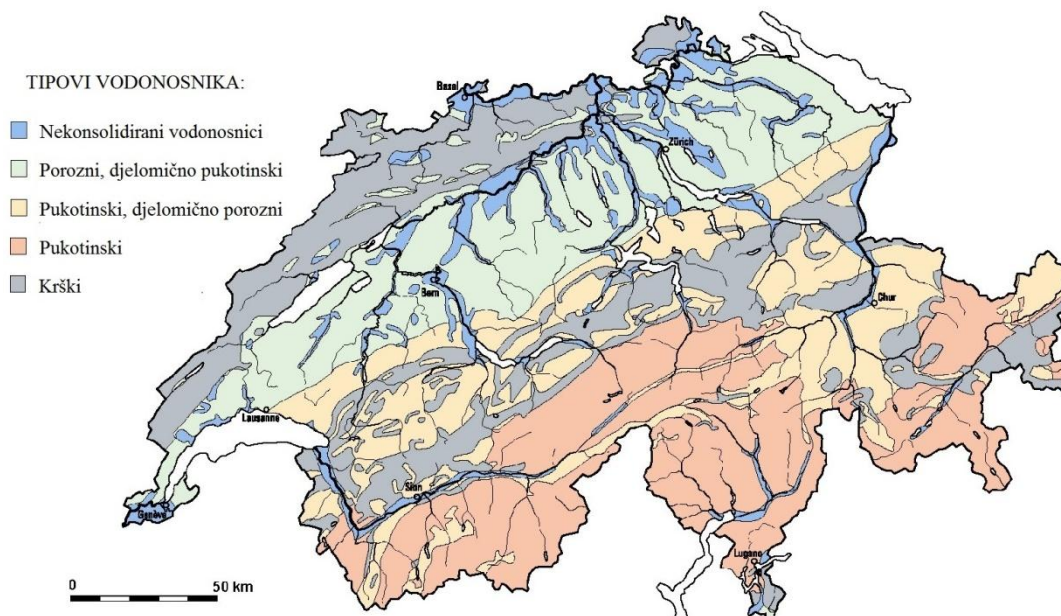
Švicarska je savezna država u središnjoj Europi. Sastoji se od triju geografski različitih dijelova: planinskog masiva Jure na sjeverozapadu, visoravni u središnjem dijelu te planinskog masiva Alpi na jugu i jugoistoku. Oko 10 % državnog teritorija zauzima planinski masiv Jure, prosječne nadmorske visine 700 do 800 m, unutar kojega su razvijene brojne krške forme. Oko 30 % teritorija zauzima visoravan prosječne nadmorske visine 500 do 1000 m izgrađena od pješčenjaka i konglomerata koje pokrivaju glacijalni nanosi, a oko 60 % zauzimaju Alpe.

Švicarska se često naziva „Europskim vodospremnikom“ zbog bogatstva podzemnih i površinskih voda. Jezera i akumulacije sadrže 50 % zaliha vode, ledenjaci 28 %, podzemne vode 20 % i rijeke 25 % (Proleksis enciklopedija, 2015).

Najvažnije zalihe podzemnih voda koje se koriste za vodoopskrbu nalaze se u nekonsolidiranim vodonosnicima uz riječne doline i velike Alpske doline. Krško područje Jura i Alpa sa svojim velikim izvorima također su važni resursi podzemnih

voda. Porozne i pukotinske stijene na platou i ispucale stijene Alpa čine važne izvore podzemnih voda.

Tri vrste vodonosnika se razlikuju po svojoj geološkoj građi i imaju specifične karakteristike (protok, zaštitu od utjecaja onečišćenja). To su nekonsolidirani, pukotinski i krški vodonosnici (slika 9). Ova podjela tvori osnovu za karakterizaciju podzemnih voda u Švicarskoj (FOEN, 2009).



Slika 9. Hidrogeološka karta Švicarske (FOEN, 2015)

Visoka kvaliteta podzemnih voda u Švicarskoj predstavlja nacionalno bogatstvo. Zbog toga su osnovni ciljevi Švicarske politike zaštite voda:

- uspostavljanje i održavanje dobre ekološke i kemijske kakvoće vodnih tijela,
- osiguravanje adekvatne opskrbe pitke i tehnološke vode u pogledu kvalitete i kvantitete
- osiguravanje dugoročnog korištenja ostalih voda za javni interes.

Kako bi se zaštitile različite vrste vodonosnika potrebno je slijediti primjerene propise za koje je *Federal Office for the Environment* (FOEN) razvio određene praktične smjernice. One naglašavaju postojeće slabosti u provedbi zakonskih propisa i daju popis najvažnijih mjera za rješavanje problema kako bi upravljanje podzemnim vodama bilo što učinkovitije (Hartmann i sur. 2008).

Švicarska kao neutralna zemlja ne provodi direktive EU vezane za vode, ali sudjeluje u zajedničkom upravljanju međunarodnim riječnim slivovima, poput rijeke Rajne. te u razmjeni informacija, razvijanju smjernica, istraživanju slivova i razvijanju europskog sustava upravljanja vodama s ostalim članicama EU (ODV, 2000). Vezano za zaštitu podzemnih voda, u Švicarskoj su na snazi Savezni zakon o zaštiti voda (*Federal Waters Protection Act, WPA, 1991*) te Pravilnik o zaštiti voda (*Waters Protection Ordinance, WPO, 1998*). Oni obuhvaćaju područja upravljanja, opskrbe, pročišćavanja i zaštite površinskih i podzemnih voda (FOEN, 2015).

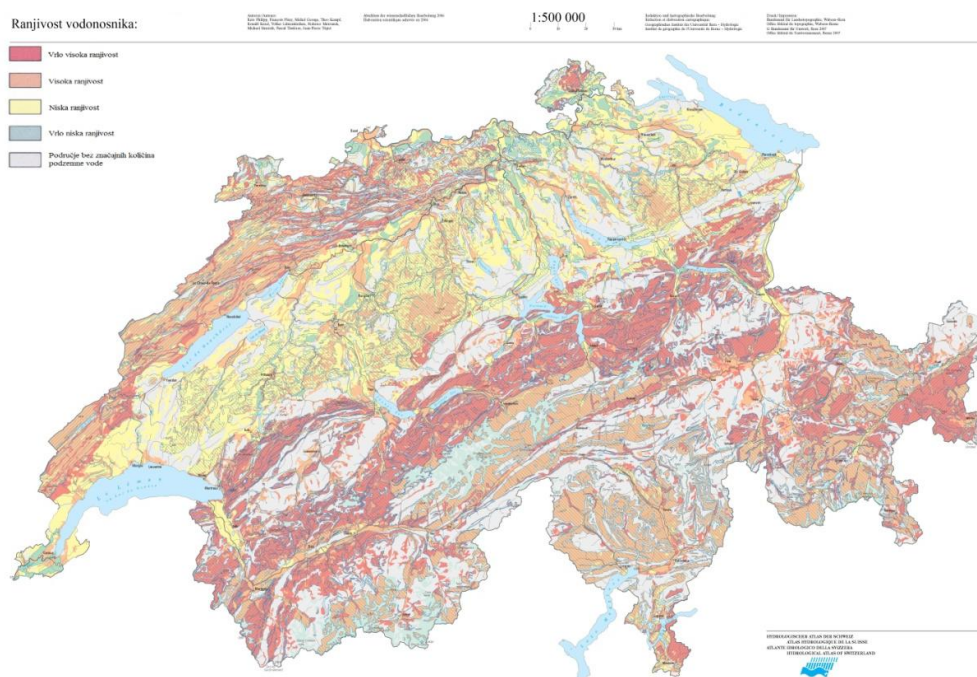
Svrha **Saveznog zakona o zaštiti voda** (WPA) je zaštititi vode od štetnog djelovanja i odnosi se na površinske i podzemne vode. neki od ciljeva su: očuvati zdravlje ljudi, životinja i biljaka; jamčiti opskrbu i gospodarsku uporabu vode za piće i vode potrebne za druge namjene; očuvanje prirodnih staništa autohtone flore i faune; očuvati vode pogodne kao staništa za ribe; očuvanje vode kao element krajolika; osigurati navodnjavanje poljoprivrednog zemljišta i dr.. Svatko je dužan poduzeti mjere opreza kako bi se izbjegli bilo kakvi štetni utjecaji na vode. Zakon se odnosi i na načelo onečišćivač plaća (FOEN, 2015).

Pravilnik o zaštiti voda (WPO) olakšava zaštitu površinskih i podzemnih voda od štetnih utjecaja i omogućuje njihovo održivo korištenje. Sve mjere koje se poduzimaju u skladu s ovim Pravilnikom moraju voditi računa o ekološkim ciljevima za vode. Ovim se Pravilnikom propisuju: ekološki ciljevi za vode; zahtjevi na kvalitetu vode; zbrinjavanje otpadnih voda; zbrinjavanje kanalizacijskog mulja; zahtjevi za uzgoj životinja i gospodarstva; zaštita voda u smislu planiranja prostora; održavanje odgovarajućeg rezidualnog strujanja; prevencija i sanacija ostalih štetnih učinaka na vode; odobravanje saveznih doprinosa (FOEN, 2015).

WPO na vrlo detaljan način definira mjere zaštite kao i vrlo specifična ograničenja ljudske aktivnosti u zaštitnim zonama podzemne vode, kao što su: gradilišta; izgradnja objekata i postrojenja iznad površine zemljišta i građevinskih promjena istih; aktivnosti povezane s geotermalnom energijom; postrojenja za otpadne vode; infiltracijska postrojenja; željeznica; postrojenja povezana s cestovnim prometom (tuneli, benzinske postaje); aerodromi; podzemne građevine; poljoprivredna zemljišta i dr..

Smjernice za zaštitu podzemnih voda (Wegleitung Grundwasserschutz, BUWAL 2000) definiraju postupke u zaštiti sanitarnih zona (Margane, 2003). Smjernice ističu različite razine zaštite podzemne vode definirajući:

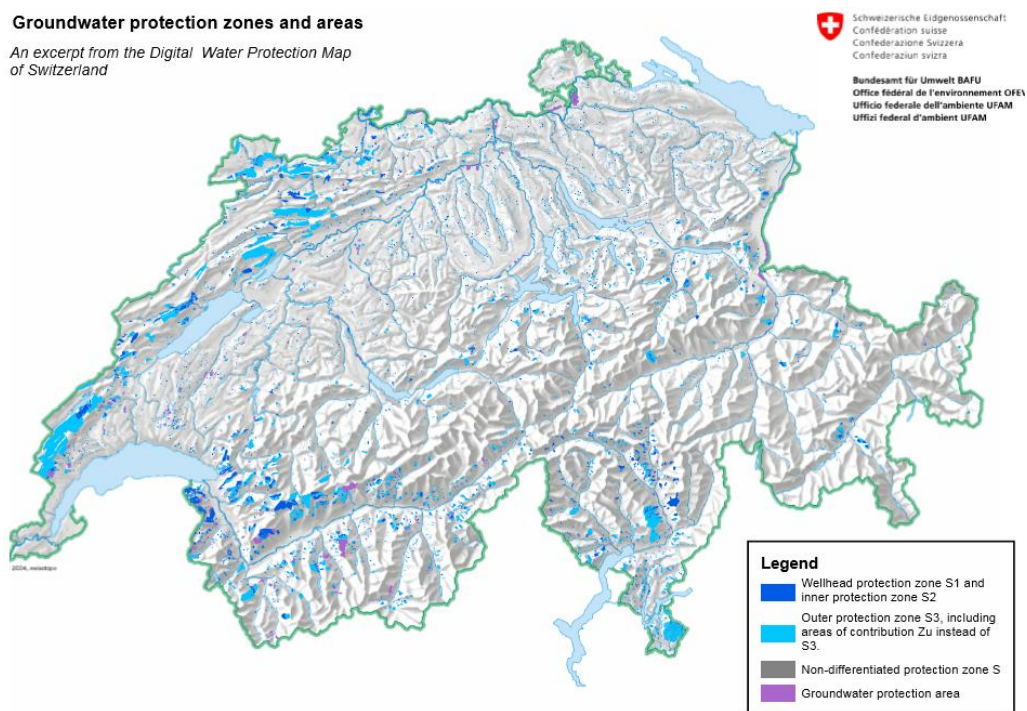
- ugrožena područja gdje je potrebna zaštita za očuvanje sigurnosti podzemne vode za eksploataciju (Gewasserschutzbereich Au)
- ugrožena područja gdje moraju biti uspostavljene zaštitne zone obnove kvalitete podzemne vode zbog toga što su postrojenja za crpljenje vode onečišćena (Zustrombereich)
- održavanje područja (Grundwasserschutzareale) za zaštitu važnih izvora podzemne vode, koje se za sada ne koriste za pitku vodu, ali bi se mogle koristiti u budućnosti
- zaštitne zone S1, S2, S3 (Grundwasserschutzzonen) za zaštitu postojećih postrojenja za crpljenje vode koje se koriste za vodoopskrbu
- druga područja koja nemaju ili imaju eksploataciju podzemne vode male važnosti



Slika 10. Karta ranjivosti vodonosnika Švicarske 2007 (Philipp R. i sur. 2007)

Za postupak izdvajanja zona zaštite vodonosnika potrebna su tri elementa: hidrogeološko izvješće, plan zaštitnih zona i kriteriji zoniranja. Plan zaštitnih zona pokazuje granice zona S1, S2 i S3 koje su utvrđene hidrogeološkim istraživanjem

(Margane, 2003). Za krške vodonosnike opisivanje zaštitnih zona se ne bazira na brzini protoka već na procjeni ranjivosti vodonosnika. Procjena ranjivosti vodonosnika (slika 10) provodi se pomoću EPIK metode koja uspoređuje ocjene geoloških, geomorfoloških i hidrogeoloških kriterija. EPIK metoda koristi četiri kriterija: razvoj gornjeg sloja krša, efikasnost zaštitnog sloja, stanje infiltracije i razvoj krške mreže (Doerfliger i Zwahlen, 1997). Na temelju karte ranjivosti dobivene su zone zaštite prikazane na slici 11.



Slika 11. Zone zaštite podzemne vode (FOEN, 2015)

Nacionalni monitoring podzemne vode, NAQUA, pruža reprezentativnu sliku stanja i razvoj podzemnih voda u smislu kvalitete i kvantitete. U okviru Nacionalnog programa praćenja podzemnih voda FOEN bilježi stanje i razvoj podzemnih izvora na više od 500 nadzornih mjesta u Švicarskoj. Prate se prirodni uvjeti i utjecaj ljudskih aktivnosti na vodonosnike u Švicarskoj (FOEN, 2015).

Svrha Nacionalnog programa praćenja je:

- dokumentacija stanja i razvoj kvalitete podzemnih voda i količinu na nacionalnoj razini;
- otkrivanje pojave problematičnih tvari u ranoj fazi i sustavno praćenje neželjenog razvoja;

- provjera učinkovitosti donesenih zaštitnih mjera (npr ekološke mjere u poljoprivredi) i utvrđivanje potreba za daljnjim mjerama;
- karakteriziranje i klasificiranje najvažnijih resursa podzemnih voda u Švicarskoj.

Rezultati Nacionalnog monitoringa podzemnih voda pokazuju da je podzemna voda dobre kvalitete dostupna u dovoljnim količinama gotovo posvuda u Švicarskoj. Tragovi umjetnih tvari nalaze se uglavnom u regijama s intenzivnom poljoprivredom (FOEN, 2015).

3.3 Zaštita krških vodonosnika u Hrvatskoj

Planinski masiv Dinarida, u kojima dominiraju pretežito karbonatne stijene (vapnenci i dolomiti) u Republici Hrvatskoj izgrađuje većinu prostora južno od Karlovca. Teritorijalno gledajući to znači da je oko 50 % kopnenog dijela Republike Hrvatske izgrađeno od karbonatnih stijena u kojima su mogući procesi okršavanja, odnosno razvoj krških vodonosnika. Ako se uzme u obzir i činjenica da je vodoopskrba priobalnog dijela Hrvatske vezana isključivo uz krške vodonosnike (PUVP, 2013) bez mogućnosti alternativnih rješenja, tada je sasvim jasno da krški vodonosnici imaju velik značaj u razvitku Republike Hrvatske. Zbog toga je potrebno zaštititi krške vodonosnike, ali istovremeno omogućiti i normalan razvitak na što većem području priobalne Hrvatske, što zahtijeva dobro poznavanje krških vodonosnika. Postoje ideje unificirane zaštite cijelih drenažnih sustava, međutim takav pristup pretvorio bi veći dio krških područja u besperspektivna geta ili, što pokazuje iskustvo, u prostore bez primjene zaštitnih mjera (Biondić i sur., 1998).

Krško je područje s obzirom na morfološke i klimatske značajke uobičajeno relativno slabo naseljen prostor, ali velika krška polja i obalno područje pružaju dobre uvjete urbanoga i gospodarskoga razvoja. Izgradnja prometnica za povezivanje sjevernoga i južnoga dijela države u znatnoj mjeri remeti održivost vodnih resursa na tom području.

Otpadne vode i komunalni otpad naselja u visokim zonama Dinarskog krša zbog ograničenih dimenzija urbanih područja uglavnom nisu dosad bili veći problem za prirodne resurse i prostor je praktički do prije desetak godina ostao u stanju visoke kvalitete. Kakvoća podzemnih voda uglavnom je vrlo dobra, a jedine probleme stvaraju

povremena zamućenja i bakteriološka onečišćenja izvora kao posljedica jakih oborina, osobito nakon dugoga sušnog razdoblja (B. Biondić i R. Biondić, 2014).

Okvirne smjernice i svrha zaštite voda u RH predviđene su Strategijom upravljanja vodama (NN 91/2008): zaštita površinskih i podzemnih voda kao rezervi vode za piće te postojećih i planiranih područja posebne zaštite voda, ekosustavi, očuvanje biološke raznolikosti, doprinos održivom razvoju racionalnim korištenjem vodnih resursa.

Strateški dokumenti EU vezani za upravljanje i zaštitu voda: Okvirna direktiva o vodama (Water Framework Directive 2000/60/EC) i Direktiva o podzemnim vodama (Groundwater Directive 2006/118/EC) implementirani su u zakonsku regulativu Republike Hrvatske nakon njenog pristupanja EU 2013. godine. Ove direktive uspostavljaju okvir za djelovanje svih zemalja članica na području upravljanja i zaštite voda, a to je sprječavanje degradacije voda, zaštita i poboljšanje stanja ekosustava i uspostava sustava održivog korištenja voda temeljeno na dugoročnoj zaštiti vodnih resursa za postizanje dobrog kvalitativnog i kvantitativnog stanja površinskih i podzemnih voda. Direktiva o podzemnim vodama dopunjuje odredbe Direktive o vodama i uspostavlja specifične mjere zaštite podzemnih voda i cilj joj je sprječavanje i kontrola onečišćenja podzemnih voda kao i sprječavanje ili ograničavanje unošenja onečišćujućih tvari u podzemne vode.

Cjelokupna zakonska regulativa u Republici Hrvatskoj u funkciji je sprječavanja budućeg onečišćenja i progresivnog smanjivanja već postojećih onečišćenja. Osnovni zakonski dokument vezan za zaštitu voda, a time i podzemnih voda u Republici Hrvatskoj je Zakon o vodama (NN 153/2009, 63/2011, 130/2011, 56/2013 i 14/2014). Zakonom o vodama se uređuju pravni status voda, vodnog dobra i vodnih građevina, upravljanje kakvoćom i količinom voda, zaštita od štetnog djelovanja voda, detaljna melioracijska odvodnja i navodnjavanje, djelatnosti javne vodoopskrbe i javne odvodnje, posebne djelatnosti za potrebe upravljanja vodama, institucionalni ustroj obavljanja tih djelatnosti i druga pitanja vezana za vode i vodno dobro.

Zakonom o vodama je propisano i donošenje planova upravljanja vodnim područjima. Radi se o planskim dokumentima koji se donose za određeno razdoblje (uobičajeno 6 godina), nakon čega se mijenjaju i dopunjuju za naredno razdoblje. Trenutno važeći je Plan upravljanja vodnim područjima za razdoblje od 2013. do 2015. (NN 82/2013), s tim da je pred usvajanjem i novi Plan koji će obuhvaćati razdoblje od 2016. do 2021.

godine. Plan upravljanja vodnim područjima između ostaloga obuhvaća: opis prirodnih značajki i stanja voda; popis ciljeva kakvoće za površinske vode te rokove za postizanje tih ciljeva; sažeti prikaz donesenih programa mjera za postizanje ciljeva kakvoće voda; utvrđivanje sredstava potrebnih za provedbu programa predloženih mjera, pravila primjene pojedinih sastavnica Plana.

Sama provedba zaštite voda regulirana je Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011, 47/2013). Pravilnik propisuje uvjete za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta koja se koriste za javnu vodoopskrbu, mjere i ograničenja, rokove i postupak donošenja odluka. U odnosu na dosadašnje Pravilnike razlikuje se po tome što predviđa klasifikaciju izvorišta prema kapacitetu crpljenja, uvodi mikrozoniranja za aluvijalne vodonosnike, nema više pratećih smjernica, krški vodonosnici su definirani kao vodonosnici s pukotinskom i pukotinsko-kavernoznom poroznosti.

S obzirom da je zbog heterogenosti i nepredvidivosti krških terena nemoguće striktno propisati metode istraživanja, potrebno je ostaviti određenu istraživačku slobodu, ali tek iznad minimalnih sadržaja. Međutim, osnovna istraživanja su ipak definirana vodoistražnim radovima koji su sastavni dio Pravilnika (NN 66/2011). Vodoistražni radovi su stručno najznačajniji dio u zaštiti podzemnih. Njima se određuju zaštitni prostori, dinamičko funkcioniranje krških vodonosnika, dimenzije sliva i dr.

Vodoistražni radovi se uobičajeno dijele na dvije faze istraživanja. Prva faza obuhvaća prikupljanje i reinterpetaciju (analizu) svih već provedenih detaljnih vodoistražnih radova dok druga faza obuhvaća dodatne vodoistražne radove koji se provode nakon analize postojećih podataka (određuju se potrebni dodatni podaci o vodonosniku, prirodna ranjivost vodonosnika).

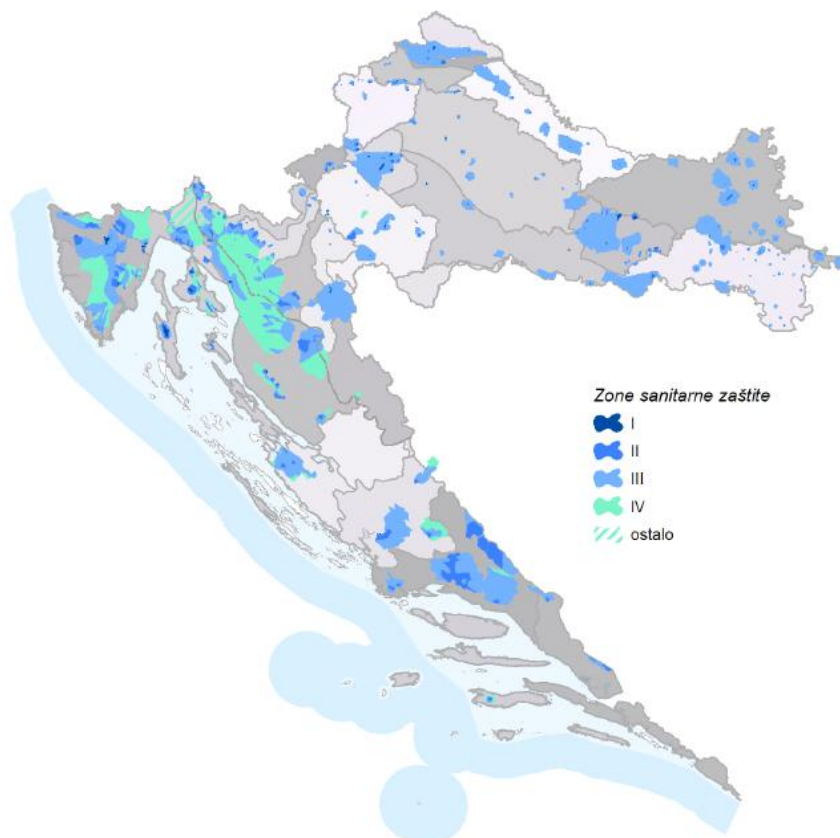
Vodoistražni radovi koji se provode su određivanje geoloških značajki i hidrogeoloških odnosa priljevnog područja, hidroloških značajki priljevnog područja, veličine, granica i izdašnost vodonosnika, tipa vodonosnika s obzirom na poroznost (međuzrnska, pukotinska, pukotinsko-kavernozna), debljina i propusnost pokrovnih naslaga vodonosnika, način napajanja vodonosnika, način dotoka vode u akumulaciju ili jezero, brzina toka podzemne vode prema izvorištu, purifikacijski kapacitet pokrovnih naslaga i

vodonosnika, kakvoća vode, analiza prirodnog sustava i ukupnog utjecaja ljudske aktivnosti.

U tablici 3 su prikazani kriteriji određivanja zona sanitarne zaštite krških vodonosnika (NN 66/2011, NN 47/2013), a na slici 12 karta zona zaštite izvorišta Republike Hrvatske, sa stanjem do 2012. godine.

Tablica 3. Kriteriji zaštite krških vodonosnika (NN 66/2011, NN 47/2013)

Zona sanitarne zaštite		Vodonosnici pukotinske i pukotinsko-kavernozne poroznosti
Zona strogog režima zaštite i nadzora	1A	Neposredno naplavno područje
	1B	Izdvađa se ako je I. zona velika i na strmom i nepristupačnom terenu
Zona strogog ograničenja i nadzora	2	Do 24 sata ili > 3 cm/s
Zona ograničenja i Nadzora	3	1 –10 dana ili 1–3 cm/s
Zona ograničenja	4	10 –20 dana za izvorišta maks. kapaciteta < 20 l/s ili < 1 cm/sili ukupno priljevno područje
		20 –40 dana za izvorišta maks. kapaciteta 20-100 l/s ili < 1 cm/s ili ukupno priljevno područje
		40 –50 dana za izvorišta maks. kapaciteta > 100 l/s ili < 1 cm/sili ukupno priljevno područje
Vodoopskrbni Rezervat		



Slika 12. Pregledna karta zona sanitarne zaštite u Republici Hrvatskoj; stanje u 2012. (PUVP, 2013, 2016)

Nakon što se odredi klasifikacija izvorišta, ukoliko su izvedeni svi potrebni vodoistražni radovi te na temelju njih izrađen Elaborat zona sanitarne zaštite, prostor se rezervira za zone sanitarne zaštite izvorišta. Nadalje, donosi se nacrt odluke i program mjera sanacije te mjere zaštite u zonama.

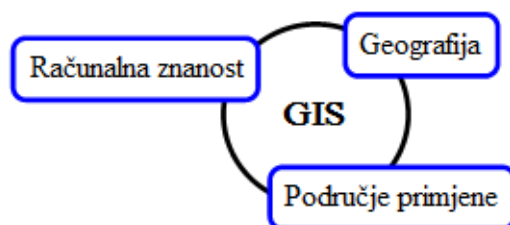
Mjere zaštite mogu biti pasivne i aktivne. Pasivne su mjere sastavni dio Odluke o zaštiti izvorišta. npr. vodne građevine za zaštitu voda, uređaji za prethodno pročišćavanje (industrija), uređaji za pročišćavanje otpadnih voda stanovništva i industrije i dr.. Pasivne mjere propisuju zabranjene djelatnosti u određenoj zoni zaštite. Mjere aktivne zaštite su monitoring kakvoće voda na priljevnom području izvorišta, poduzimanje aktivnosti za poboljšanje stanja voda (uvođenje čiste proizvodnje, organiziranje ekološke poljoprivredne proizvodnje, itd.), a propisuju se prema skupinama onečišćivača i po zonama sanitarne zaštite. Uvedene su kako ne bi došlo do nepotrebnih ograničavanja mogućnosti razvitka u prostoru.

4 MOGUĆNOSTI PRIMJENE GIS-a

4.1 Osnovno o GIS-u

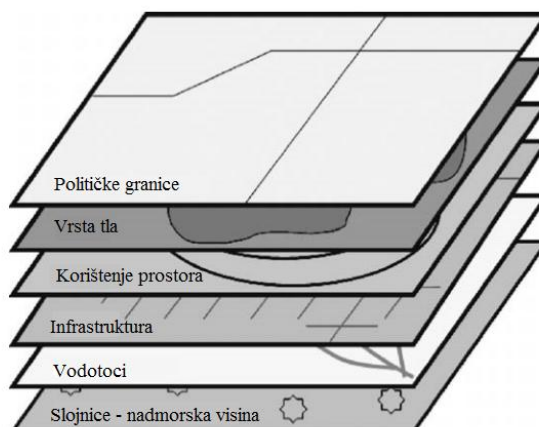
Geografski informacijski sustav (GIS) je sustav za upravljanje prostornim podacima i obilježja pridruženih njima. Prema definiciji NCGIA (National Center for Geographic Information and Analyses, USA) to je sustav hardvera, softvera i procedura koje omogućuju upravljanje, obradu, analize, modeliranje, predstavljanje i prikaz georeferenciranih podataka sa svrhom rješavanja kompleksnih problema planiranja i gospodarenja prostorom (Biondić R, 2010). Geografski informacijski sustav (GIS) postao je jedan od najvažnijih alata za razumijevanje i donošenja odluka s problemima vezanim za upravljanje vodama i sličnih resursa u svijetu. GIS koncept i tehnologija sakuplja i organizira podatke te pomaže objasniti prostorne odnose između njih. Osnovni pregled GIS-a uključuje proces unosa i konverzije podataka, upravljanje podacima i analize (Johnson, 2009).

GIS se sastoji od tri segmenta: računalne znanosti, geografije i područje primjene tj struka u kojoj želimo primijeniti GIS (slika 13).



Slika 13. Preklapanje tehnologijskih i tradicionalnih disciplina (Biondić R., 2010)

GIS baza podataka čini niz slojeva karata koje su georeferencirane i smještene u zajedničku projekciju. GIS organizira podatke u tematske karte. Svaka od njih sadrži informacije o određenim pojavama (npr. pedološka, hidrogeološka podloga). Razdvojena, zasebna tematska karta naziva se slojem, podlogom. Nakon što su ove karte smještene unutar standardiziranog referentnog sustava, podaci prikazani na različitim podlogama mogu se međusobno preklapati (slika 14) (Johnson, 2009).



Slika 14. Primjer preklapanja slojeva (Johnson, 2009)

4.2 Mogućnosti primjene GIS-a povezane s vodnim resursima

Različite kartografske podloge jedan su od najvažnijih oblika informacija. Put do izrade takvih kartografskih informacija je ne tako davno bio vrlo kompleksan i zahtijevao je puno rada i vremena. Karte rađene na papiru sadrže baze podataka općeg tipa i u samo datom trenutku.

GIS je neizbježan alat zbog svoje nevjerojatne mogućnosti primjene (Zimmer, 2001). Broj područja primjene GIS-a ograničen je samo našom maštom i s dostupnosti podataka (IGI, 2013). Može se primijeniti kod postavljanja katastarskog informacijskog sustava, urbanističkih planova (proučavanje cesta, parcela, transportnih linija itd.), dakle umjetne, izgrađene pojave. S druge strane, geomorfolozi, ekolozi i pedolozi koriste prirodne pojave kao što su npr. vrsta stijene, tektonske ploče, vrsta vegetacije i tla. Povezivanjem analiza prirodnih i umjetnih pojava može se dobiti utjecaj ljudske aktivnosti na okoliš (Huisman i de By, 2001).

Primjena GIS alata može dovesti do poboljšanja analize i projekta. GIS može služiti: kao alat za modeliranje, u kartografiji, kao baza podataka, kao prostorna baza podataka. Koristi se u mnogim područjima znanosti: pedologija, upravljanje poljoprivredom, šumski i vodni resursi, urbanistički planovi, geologija, istraživanje mineralnih sirovina, katastar, monitoring okoliša (Huisman i de By, 2001). Poznavanje ove brzo napredujuće tehnologije može biti preduvjet za uspjeh u nastojanjima za stvaranjem pouzdane infrastrukture i očuvanja okoliša.

GIS se može koristiti za hidrološka istraživanja površinskih i podzemnih voda, hidrogeološka istraživanja, za sustave vodoopskrbe i navodnjavanja, sustave pročišćavanja voda, obrana od poplava, za monitoring kakvoće vode, upravljanje riječnim slivovima, korištenje zemljišta (Johnson, 2009). GIS ima široku primjenu kod upravljanja podzemnim vodama. Ulazni podaci koji su potrebni za analize podzemnih sustava su: hidrogeološke karakteristike (topografske karte, vodna tijela, reljefni oblici, geološke karte, hidrogeološke karte, debljina vodonosnika, pokrovne naslage i dr.), hidrološke karakteristike (lokacije aktivnih zdenaca i njihovi hidrografi, razina podzemne vode, podaci o oborinama, izdašnost izvora, i dr), kvaliteta vode (geokemijske karakteristike tla, kakvoća vode u pojedinim dijelovima vodonosnika, tipovi potencijalnog izvora onečišćenja, karte zemljišnog pokrova, podaci o kvaliteti vode na određenoj lokaciji i u određenom trenutku, i dr) te administrativni podaci (vlasnici parcela, nadležna i administrativna područja, i dr) (Winter i sur., 1998). Na temelju tih podataka dobiju se različiti rezultati ovisno o cilju analize.

U daljnjem su tekstu dodatno objašnjene neke od mogućih primjena GIS-a povezanih s istraživanjem, zaštitom ili upotrebom podzemnih voda, s obzirom na tematiku ovog diplomskog rada.

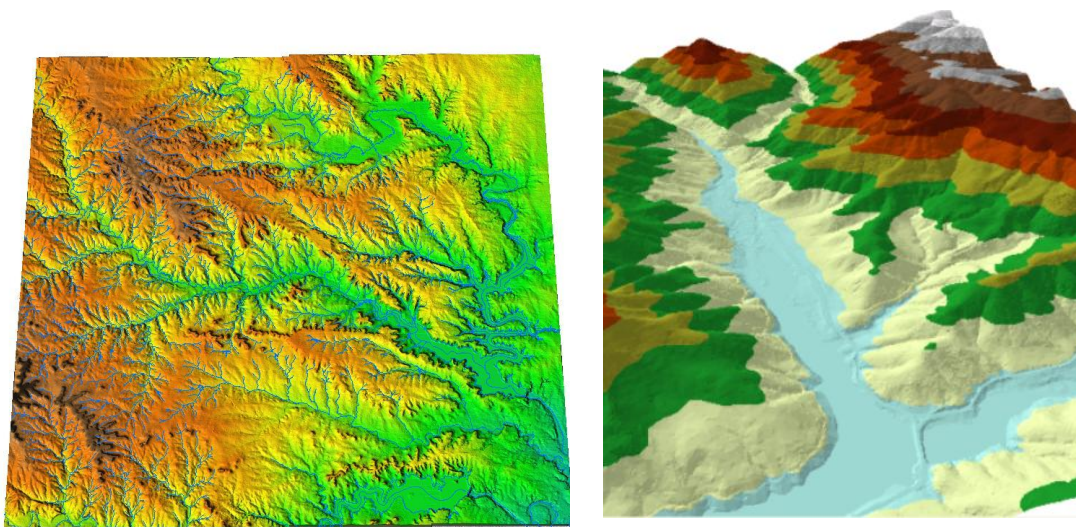
Primjena GIS-a kod hidroloških istraživanja površinskih voda

Postoje različiti aspekti izrade hidrološkog modela površinskih voda pomoću GIS-a. Podaci koji su uobičajeno potrebni za dobivanje modela su: digitalna površina terena, karakteristike tla (propusnost, debljina naslaga), oborine (kišomjerne stanice-količine oborina), smjer tečenja, korištenje zemljišta (vrsta tla i namjena), regulacijske građevine (brane) i dr.. Digitalne tehnike modeliranja terena često omogućavaju prikaz osnovnih rezultata kao što su granice slivova te prikaz drenažne mreže na temelju prostorne interpolacije točkastih podataka (Johnson, 2009). Korištenjem GIS-a se uz pomoć standardiziranih skupova podataka o pokrovu i sastavu tla, klimatskim varijablama i lokacijama mjernih postaja unapređuju proračun vezani za pojedine značajke sliva, statistike tečenja i vjerojatnosti pojave, čime se olakšava i razgraničavanje slivova.

U primjeni su uobičajeno dva modela prikaza površine terena (slika 15): DEM i TIN.

DEM (eng. *Digital Elevation Model*) je rasterski model koji prikazuje teren rasterom i često se naziva još i gridnom (rešetkastom) strukturom podataka. Gridne ćelije su obično u obliku kvadrata čiji vrhovi predstavljaju visinske točke na način da ćelija na cijeloj svojoj površini ima istu visinsku vrijednost (Grizelj Šimić, 2014).

TIN (eng. *Triangular Irregular Network*) je mreža točaka i karakterističnih strukturnih i lomnih linija površine terena. TIN je vektorski model koji se sastoji od nepravilne mreže točaka koje su linijama povezane u trokute. Ovaj model omogućava bolju aproksimaciju terena s naglim promjenama nadmorskih visina.



Slika 15. Primjeri DEM (Mitasova i dr., 2016) i TIN modela (ESRI, 2016)

Za oba modela terena potrebna je priprema konzistentnog skupa ulaznih podataka, zatim generiranje modela čime se omogućava proračun odabranih fiziografskih parametara sliva. Često kombinacija korištenja oba modela daje najbolji rezultat. Postupci koji se provode u GIS okruženju (određivanje hidroloških elemenata, analiza povezanosti i proračun parametara) služe kao ulazni podaci za hidrološko modeliranje, još jedan vrlo značajan vid upotrebe GIS tehnologije. Primjeri takvog modeliranja su kretanje onečišćenja u vodotoku, određivanje poplavnih područja, modeliranje procesa otjecanja sa sliva, model izokrona koji je značajan za utvrđivanje realnog vremena koncentracije, jer povezuje vrijeme koncentracije s oborinskim i fiziografskim svojstvima sliva (Grizelj Šimić, 2014).

Primjena GIS-a kod sustave vodoopskrbe i navodnjavanja

Različite karakteristike klime, reljefa i geologije na pojedinim područjima kontroliraju količine vode na raspolaganju i pružaju osnovne uvjete za zahvaćanje i distribuciju vode. GIS alati služe za procjenu i vrednovanje mogućih vodoopskrbnih objekata. Temeljni cilj je procijeniti potražnju za vodom na temelju razvijenosti vodoopskrbne mreže i sustava kanala za navodnjavanje. Kod sustava navodnjavanja i vodoopskrbe GIS koristi podatke o: terenu, hidrološkim granicama, dostupnost vode, transport vode, korištenje zemljišta, vodoopskrbna mreža, vremenske prilike (oborine, brzina vjetra), mreža navodnjavanja i dr..

GIS alati i integrirani modeli nalaze mnoge primjene kod navodnjavanja, uključujući i financijske analize, utvrđivanje potrebe za vodom i planiranje navodnjavanja. Financijske analize koriste GIS za kvantificiranje i kartiranje ukupne financijske prednosti navodnjavanja (novčani iznos/ha) i financijske učinke u slučaju djelomične ili potpune zabrane navodnjavanja. Zahtjevi za navodnjavanje određuju se kartiranjem prostorne raspodjele potrebe za vodom na temelju distribucije tla i poljoprivrednih kultura (Johnson, 2009).

Primjena GIS-a kod sustava pročišćavanja voda

GIS se može koristiti za osnovna pretraživanja i mrežne operacije koje omogućuju uzimanje podataka za projektiranje i upravljanje tih sustava, planiranje, kao i za spremanje, pronalaženje podataka. GIS može pripomoći pri odnosu s korisnicima, predviđanju, otklanjanu kvarova, planiranju, strategijama i analizama tržišta (Johnson, 2009). GIS pomaže pri odabiru lokacije uređaja za pročišćavanje otpadne vode, koji je krajnji element sustava odvodnje. Na taj je način olakšan sam postupak odabira lokacije uzimajući u obzir različite propise, standarde, kao i karakteristike okolnog terena i vegetacije. GIS omogućuje i praćenje kvalitete vode i nakon pročišćavanja čime se stvaraju dobri uvjeti za njeno ponovno korištenje (Jurišić i dr., 2014).

Primjena GIS-a vezana za podzemne vode

GIS kao alat je pronašao svoju primjenu u procjeni podzemnih voda jer postoje različiti tipovi i velike količine podataka koje su uključene u analize. Pravilna procjena podzemnih voda zahtijeva temeljita istraživanja hidroloških, geoloških i hidrauličkih

parametara. Upotreba simulacijskih modela rasprostranjena je u takvim istraživanjima čime je GIS postao glavna tehnologija za koordinaciju i upravljanje podacima. Podaci potrebni za analize podzemnih voda su: hidrogeološki, hidrološki, kvaliteta vode, administrativni podaci.

Kvantitativne metode koje služe za određivanje toka i pronosa onečišćenja su: metoda konačnih razlika (MODFLOW), metoda konačnih elemenata (FEFLOW), metoda konačnih volumena. GIS omogućuje upravljanje podacima, modeliranje sustava podzemnih voda te prikaz samih rezultata. U GIS programima se može prikazati sniženje razine podzemne vode, pronos onečišćenja u vodonosniku i nadmorska visina vodonosnika koristeći MODFLOW simulacije (Johnson, 2009).

4.3 Mogućnost primjene GIS-a u zaštiti krških vodonosnika

Iz do sada navedenoga su očigledne dva osnovna pristupa povezana s primjenom GIS-a u zaštiti krških vodonosnika: ili se koristi kao alat za prikaz zaštitnih zona, odnosno za projektiranje određenih sustava povezanih sa zaštitom podzemnih voda, ili se koristi kao alat za modeliranje ranjivosti koja se zatim može upotrijebiti prilikom procjene zaštite podzemnih voda. Međutim, treba napomenuti kako bi se i kombinacijom ova dva osnovna pristupa vjerojatno dobila najbolja iskoristivost svih potencijala GIS-a.

4.3.1 GIS kao alat za prikaz zaštitnih zona

Prema Pravilniku o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite (NN 66/11) „Naručitelj iz Vodoistražnih radova je u obvezi dostaviti Hrvatskim vodama elaborat zona sanitarne zaštite u digitalnom obliku pogodnom za daljnju obradu u GIS aplikacijama te aplikacijama za tablične kalkulacije i aplikacijama za obradu teksta, usklađenih s Informacijskim sustavom voda“ (Pravilnik NN 66/11). Pravilnikom je istaknuta potreba obrade svih podataka GIS tehnologijom, pri čemu se misli na prikaz prostornih podataka u svrhu korištenja kod krajnjega korisnika (npr. Zavodi za prostorno planiranje, Hrvatske vode), a ne na dodatne analize i obrade GIS alatima za

dobivanje dodatnih podataka važnih pri definiranju zaštitnih zona i mjera zaštite (R. Biondić, 2005).

Nedostaci

S obzirom da u Hrvatskoj trenutačno procjena prirodne ranjivosti nije obvezna metoda kod određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta, ona nije niti predviđena zakonskom regulativom. Zbog toga nije definirana niti upotreba GIS-a kao alata za dobivanje dodatnih podataka važnih za definiranje zaštitnih zona.

Prednosti

Prednost GIS-a je upravo u tome što može povezati različite podatke u prostornom smislu i donijeti zaključak o njihovoj vezi (npr. naseljenost i stanje kakvoće voda na određenom prostoru). Omogućava odabir različitih pogleda na rezultate ovisno za koju svrhu nam trebaju. Rezultati mogu biti u obliku novih skupova digitalnih prostornih podataka, karata, tablica, izvješća, 3D modela terena, u formi tematske karte. Uvođenjem GIS-a ubrzala bi se izrada samih karata i njihovo održavanje, poboljšala bi se kvaliteta podataka. Preklapanjem različitih podloga dobili bi se dodatni podaci.

4.3.2 GIS kao alat za modeliranje ranjivosti

Ubrzani razvoj industrije tijekom XX. stoljeća prouzročio je značajnu degradaciju vodnih resursa u cijelom svijetu. Zbog spoznaje da različiti prirodni sustavi različito reagiraju na sve veća opterećenja prostora potrebno je odrediti prirodnu ranjivost vodonosnika i zaštitu ovisno o njegovim karakteristikama.

Modeliranje ranjivosti krških vodonosnika se temelji na podacima o vrsti tla (geološki parametri) i hidrogeološkim parametrima (npr. propusnost, razvoj krške mreže). Dobivene karte prirodne ranjivosti mogu biti bitan element u donošenju odluka za mjesta gdje se nalaze potencijalno onečišćujuće djelatnosti.

Svi podaci za potrebe izrade jedne karte ranjivosti od onečišćenja spremaju se u okviru GIS sustava i integriraju u okviru formiranog GIS modela. Podaci su sadržani u osnovnim slojevima modela (eng. *Layers*), i to su najčešće geološki i strukturno

geološki, hidrogeološki podaci, vegetacija i pedologija, u koje su dodani hidrometeorološki podaci, satelitske snimke, snimke iz zraka, morfološki podaci i dr.

Karte ranjivosti se mogu koristiti za izdvajanje zona zaštite sliva ili pojedinog vodoopskrbnog objekta za kartiranje ranjivosti cijelog sliva, za kartiranje ranjivosti pojedinog izvora ili nekog drugog tipa vodoopskrbnog objekta. Prve procjene prirodne ranjivosti vodnih resursa u Europi napravljene su u Francuskoj (Margat 1968, Albinet i Margat 1970) te u Zapadnoj Njemačkoj (Vierhuff i sur., 1981). Do danas su u cijelome svijetu osmišljene brojne metode: DRASTIC, AVI, GOD, GLA, ISIS, EPIK, Irska metoda, REKS, Austrijska metoda, VULK, Time-Input, LEA, PI, COP. U nastavku se kao primjeri daju kratki prikazi nekoliko metoda.

DRASTIC metoda se koristi za određivanje ranjivosti podzemne vode od onečišćenja. Na temelju hidrogeoloških parametara i antropogenog utjecaja, karte ranjivosti podzemne vode prikazuju područja s najvećom mogućnosti onečišćenja. Metoda pri analizi uključuje sedam parametara: dubina do podzemne vode, područje prihranjivanja, karakteristike vodonosnika, tlo, topografija (nagib terena), utjecaj nesaturirane zone, hidraulička vodljivost (Aller i sur., 1987).

EPIK metoda se također koristi za određivanje ranjivosti podzemne vode. Temelji se na specifičnim geološkim, geomorfološkim i hidrogeološkim faktorima. Kod analize tom metodom uključuju se četiri parametra: epikrška zona (E), pokrovne zaštitne naslage (P), sustav infiltracije (I) i razvoj krških formi (K). Svakome od tih parametara dodijeljen je težinski faktor koje se nalazi u rasponu od 1-3. Razlikuju 4 stupnja ranjivosti temeljenih na analizi navedena 4 parametra. Zaštitni faktor (F_p) se izračuna zbrajanjem ocjene za svaku skupinu određenog parametra koji je pomnožen pripadajućim težinskim faktorom:

$$F_p = 3E + 1P + 3I + 2K$$

Preklapanjem slojeva prethodna četiri parametra koristeći GIS tehnologiju za izračun indeksa zaštitnog faktora (F_p), dobiva se karta ranjivosti EPIK metodom (Doerfliger i Zwahlen, 1995).

PI metoda (Goldscheider et al., 2000) temeljena je na kartiranju ranjivosti korištenjem geografskog informacijskog sustava (GIS). Razvijena je temeljem iskustava GLA, Irske

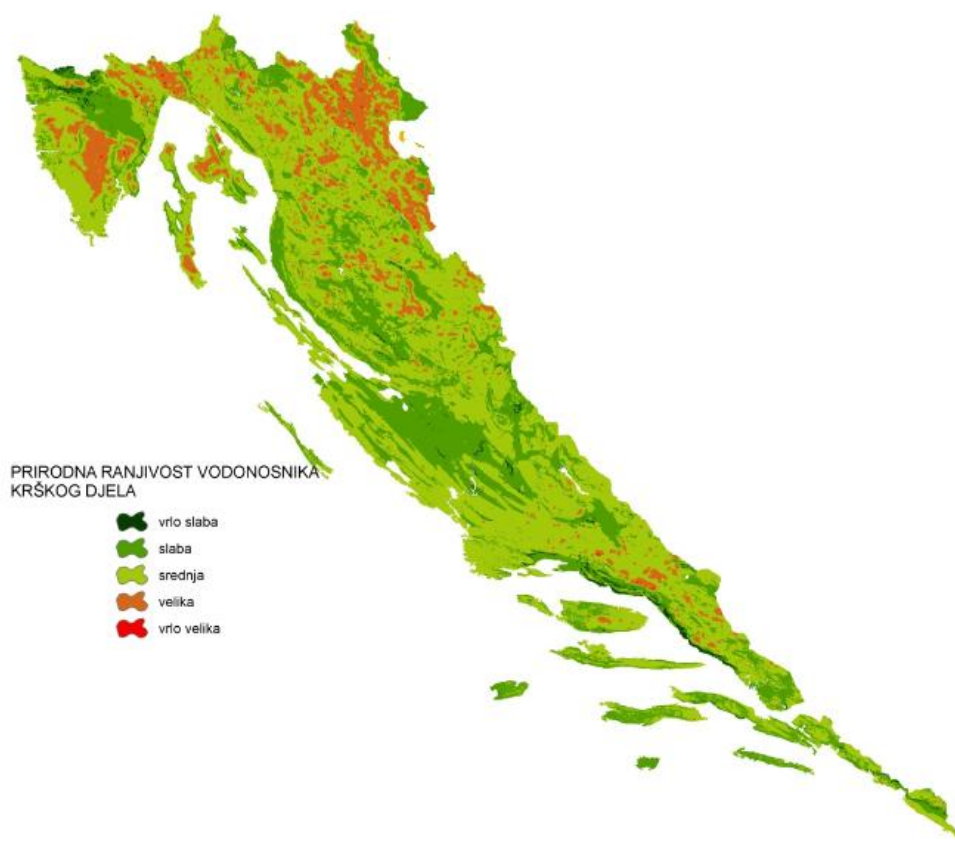
i EPIK metode. Za procjenu ranjivosti koriste se svojstva pokrivača (P) koji opisuje zaštitnu ulogu slojeva između površine terena i površine podzemne vode, i uvjete infiltracije (I), posebice ulogu zaštitnog pokrivača zbog lateralnih površinskih i potpovršinskih tokova kroz ponore i vrtače.

COP metoda (Vías et al, 2002) je razvijena tokom 2001. – 2002. u Hidrogeološkom odijelu Sveučilišta u Malagi. Metoda koristi podatke o pokrivaču, koncentraciji tokova vode i oborinama. O faktor krovinskih naslaga (eng. Overlying layers) ukazuje na mogućnost da naslage nesaturirane zone vodonosnika razrijede i smanje nepovoljan učinak onečišćenja. O faktor se procjenjuje kombinacijom ocjena značajki tla i litološke građe nesaturirane zone vodonosnika. C faktor koncentracije toka (flow Concentration) uzima u obzir površinske uvjete koji kontroliraju površinsko otjecanje, jer dijelovi sliva na kojima dolazi do površinskog otjecanja imaju manji kapacitet razrjeđenja onečišćenja. Faktor C predstavlja stupanj koncentracije površinskog otjecanja do ponora, jama ili sličnih krških obilježja, koje omogućuju izravnu infiltraciju oborina, zaobilazeći pri tome naslage nesaturirane zone i njihovu zaštitnu funkciju. P faktor oborina (Precipitation) uzima u obzir sposobnost vode (u ovom slučaju oborina) da prenese onečišćenje s površine kroz nesaturiranu zonu do vodnog lica. Što je ta sposobnost veća, veća je i ranjivost vodonosnika od onečišćenja.

Devedesetih godina prošloga stoljeća pokrenut je prvi europski projekt vezan isključivo za zaštitu krških vodonosnika (COST 65, 1995) jer se uvidjela važnost multidisciplinarnog pristupa i istraživanja u svrhu dobivanja informacija o krškoj sredini i dinamici tečenja vode u podzemlju. Osnovna pretpostavka je bila da fizički uvjeti u okolišu pružaju određenu prirodnu zaštitu podzemnim vodama. Predloženo je određivanje prirodnih značajki krškog područja kroz multiparametarsku analizu podataka koristeći GIS tehnologiju, pri čemu bi se dobivale relativna, nemjerljiva, bezdimenzijska svojstva prirodnog sustava uz istovremeno izdvajanje različito ranjivih područja. Rezultat je bila izrada Europskog pristupa kartiranja prirodne ranjivosti, opasnosti i analize rizika koje je obrađena u sklopu COST projekta 620 pod naslovom „Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers“ (COST 620, 2004).

Trenutačno se u Republici Hrvatskoj za ocjenu stupnja prirodne ranjivosti krških vodonosnika koriste tri skupine hidrogeoloških parametara: geološka građa vodonosnika, izražena preko stupnja vodopropusnosti stijena i naslaga, od površine terena preko nesaturirane do saturirane zone, stupanj okršenosti, izražen preko koncentracija vrtača, jama s vodom i stalnih i povremenih ponora, te nagib terena i količina oborina.

Metodologija se u Republici Hrvatskoj službeno prvi put primijenila u sklopu izrade PUVP (2013), Dodatak II - Analiza značajki jadranskog vodnog područja. Detaljne razrade i analize su napravljene na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (Biondić i sur., 2009). Na temelju rezultata prostorne analize utjecajnih parametara, područje krša u Hrvatskoj podijeljeno je u pet kategorija ranjivosti, u rasponu od vrlo slabe do vrlo velike (slika 16).



Slika 16. Prirodna ranjivost vodonosnika krškog dijela (PUVP, 2013)

U zadnjih nekoliko godina, na Geotehničkom fakultetu su razvijena i dodatna dva modela procjene prirodne ranjivosti krških vodonosnika. Jedan model je razvijen na

području sliva Jadrta i Źrnovnice u Dalmaciji pod nazivom *Hrvatski pristup* (Loborec, 2013), a drugi je razvijen u sklopu UNESCO i MedPartnership projekta na slivu Novljanske Źrnovnice u Lici i Hrvatskom primorju pod nazivom *Karst Aquifer Vulnerability Assessment metoda* (Biondić i sur., 2014, 2015).

Nedostaci

Različite metode određivanja prirodne ranjivosti krških vodonosnika pružaju još jedan dodatni "podatak" u ukupnoj analizi, povećavajući kvalitetu izdvajanja zona sanitarne zaštite, čime se otvara mogućnost primjene ove metode kod krških područja kao dodatni "sloj" multidisciplinarnih istraživanja za zaštitu krških vodonosnika (R. Biondić, 2005). Međutim, osnovni nedostatak ovakve upotrebe GIS prostornih analiza bilo bi moguće isključenje izvođenje kompleksnih hidrogeoloških istraživanja.

Prednosti

Karte ranjivosti su važan dio programa kod zaštite podzemnih voda i bitan su element pri donošenju odluka na mjestima gdje se nalaze potencijalno onečišćujuće djelatnosti.

Prvo, ocjena ranjivosti može biti mjera vjerojatnosti pojave onečišćenja na području. Drugo, karte ranjivosti pomažu kako bi se osigurala zaštita podzemnih voda koja nužno ne ograničava gospodarske aktivnosti i napredak. Treće, karte ranjivosti doprinose razvitku područja gdje postoji mogućnost od onečišćenja, ali se ono zapravo nalazi na području niske ranjivosti na temelju čega se smanjuju preventivne mjere zaštite (EPA IR, 1999).

Primjena GIS-a preporuča se u postupku provedbe zaštite kako bi se osigurali jeftiniji i brži rezultati (npr. parametarski slojevi se lako prenose pomoću GIS-a u usporedbi s drugim metodama procjene za isto područje). Dakle potrebne su baze podataka kartiranja prirodne ranjivosti (npr. podaci o debljini pokrovnih naslaga) za modeliranje GIS tehnologijom (COST 620, 2004).

5 POTREBNE PODLOGE ZA PRIMJENU GIS-a U ZAŠTITI KRŠKIH VODONOSNIKA

5.1 Zahtjevi GIS-a s obzirom na postojeću primjenu u zaštiti

Zone sanitarne zaštite mogu se utvrditi ako su provedeni vodoistražni radovi i ako je izrađen elaborat zona sanitarne zaštite. Vodoistražni radovi su radovi i ispitivanja koji uključuju geološka, hidrogeološka, hidrološka, hidrogeokemijska i kemijska istraživanja i prethodno su opisani u poglavlju 3.3 Zaštita krških vodonosnika u RH.

Elaborat zona sanitarne zaštite se izrađuje u digitalnom obliku na temelju podloga vodoistražnih radova, hidrogeoloških podloga, kakvoće izvorske vode, hidroloških analiza, katastra onečišćivača na temelju čega se dobiva karta prirodne ranjivosti.

Temeljni grafički prikazi sa svim potrebnim podacima za IV. i III. zonu sanitarne zaštite su u mjerilu 1:25.000, za II. zonu sanitarne zaštite u mjerilu 1:5.000, te za I. zonu sanitarne zaštite u mjerilu 1:1.000.

Obvezna primjena karte prirodne ranjivosti je pri izradi projekata ocjene stanja i rizika cjelina podzemnih voda koje svaka zemlja članica Europske Unije, pa tako i Hrvatska, mora izrađivati za svoja vodna područja svakih šest godina (R. Biondić, 2014).

Kako bi se u GIS projektu mogle prikazati zone sanitarne zaštite potrebne su hidrogeološke i hidrološke podloge, podaci o kakvoći vode, administrativni podaci. Svaka podloga označava pojedini sloj u GIS projektu koji se može uključiti / isključiti ovisno o parametrima koji nam trebaju za analizu.

Hidrogeološke podloge se sastoje od topografskih podloga (osnovni podaci o reljefu- npr. vrtače, vodotoci, izvori), geoloških podloga, i dr.. Hidrološke podloge čine podaci o zdencima, piezometrima, razine podzemne vode u određenom vremenskom periodu, količine oborina, prostorni položaj razvodnica, mjesta i količine ulaza i izlaza vode u sustav, propusnost sustava.

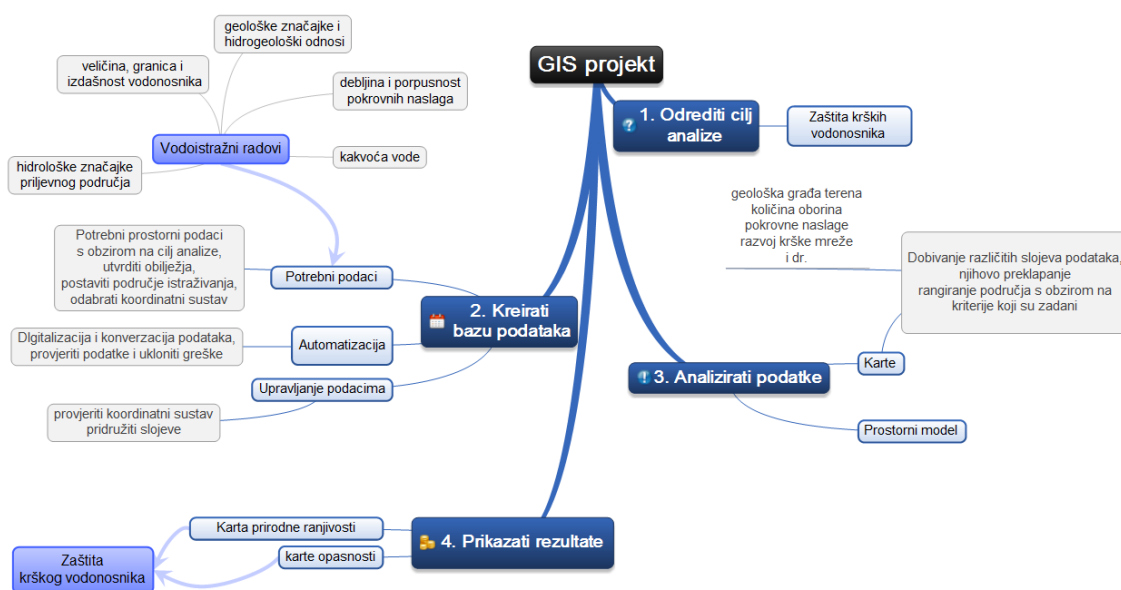
Podloge o kakvoći vode su podaci o geokemijskim karakteristikama vodonosnika, korištenje terena, tip podzemnog toka i dr. Administrativne podloge čine upravne i administrativne granice, granice posjeda (Winter i sur., 1998). Na GIS karti su vidljiva

krška obilježja, granice zona zaštite. Klikom na određeni podatak mogu se dobiti dodatne karakteristike npr. nadmorska visina, količina oborina, temperatura.

5.2 Zahtjevi GIS-a s obzirom na buduću primjenu u zaštiti

5.2.1 Planiranje GIS projekta

Za GIS projekt potrebno je odrediti cilj projekta, kreirati baze podataka koje sadrže ključne podatke za rješavanje problema, koristiti GIS funkcije za stvaranje analitičkih modela i na kraju prikazati rezultate analize (slika 17).

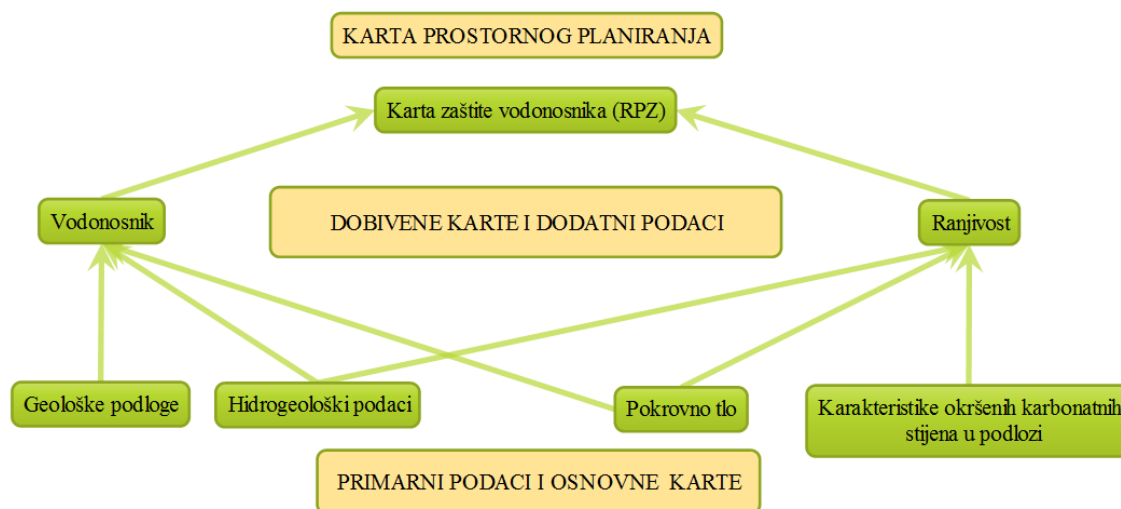


Slika 17. Prikaz strukture GIS projekta (Booth i Mitchell, 2001)

U slučaju pripreme zaštite podzemnih voda krških vodonosnika cilj je sama zaštita vodonosnika. Bazu podataka čine rezultati vodoistražnih radova, odnosno podaci o geološkim značajkama i hidrogeološkim odnosima priljevnog područja, hidrološke značajke priljevnog područja, veličina, granica i izdašnost vodonosnika, debljina i propusnost pokrovnih naslaga, brzina toka podzemne vode, kakvoća vode, analiza prirodnog sustava i ukupni utjecaj ljudske aktivnosti itd..

Na slici 18 je prikazan primjer GIS projekta zaštite vodonosnika u Irskoj koji se koristi kod planova prostornog uređenja područja. Osnovni podaci koji su potrebni za analizu su geološke i hidrogeološke podloge, pokrovno tlo te karakteristike okršanih stijena u podlozi. Preklapanjem potrebnih slojeva dobivaju se podloge u ovom slučaju vrsta

vodonosnika i njegova ranjivost. Njihovom kombinacijom dolazi se do karte zaštite vodonosnika koja služi kod prostornog planiranja za razvoj djelatnosti i namjenu površina te uvjete za održivi razvitak na području.



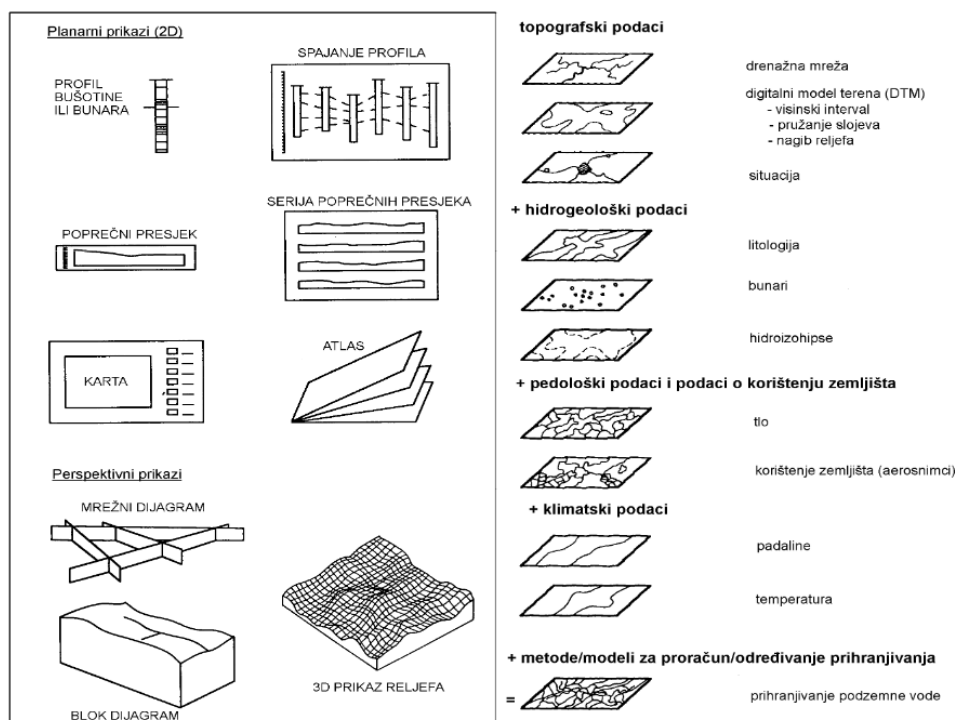
Slika 18. Primjer planiranja GIS projekta (DELG/EPA/GSI 1999).

Elementi hidrogeološke podloge su ocjena stupnja razvoja površinskih i podzemnih krških oblika, vodne pojave (izvori, vrulje, estavele, bušeni i kopani zdenci, podzemni rudarski radovi, ponori, vodeni tokovi i dr), kategorizacija izvorišta, strukturne i piezometarske bušotine i dr. Podatke vodoistražnih radova potrebno je digitalizirati i smjestiti u odabrani koordinatni sustav i rasporediti u različite slojeve. Preklapanjem odabranih slojeva podataka, ovisno o odabranoj metodi, dobivaju se rezultati analize, karte prirodne ranjivosti, karte opasnosti od onečišćenja vodonosnika. U krškom dijelu Republike Hrvatske karte prirodne ranjivosti su određena preko tri skupine hidrogeoloških parametara: geološke građe vodonosnika, stupnja okrušenosti i nagiba terena te količine oborina.

5.2.2 Potrebne podloge

Primjena GIS alata može dovesti do poboljšanja analize i projekta. GIS može služiti: kao alat za modeliranje, u kartografiji, kao baza podataka, kao prostorna baza podataka. Podloge koje se pritom mogu koristiti su hidrogeološki podaci, geološki podaci dostupnost vode na određenoj lokaciji, transport vode, korištenje zemljišta,

vodoopskrbna mreža, vremenske prilike (oborine, brzina vjetra), mreža navodnjavanja, karte onečišćivača i dr (slika 19).



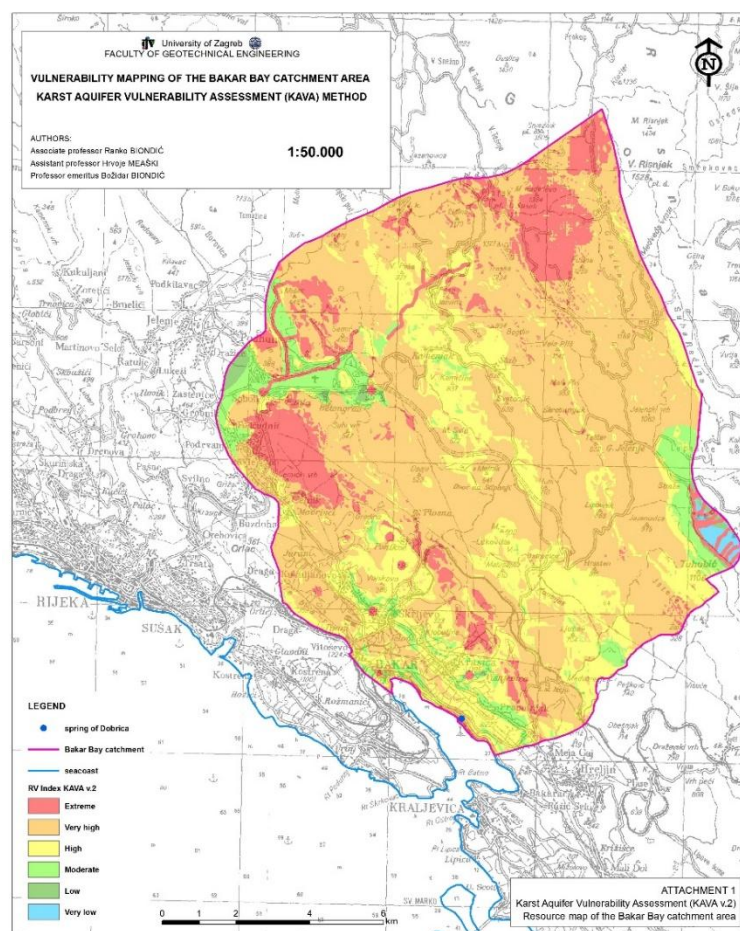
Slika 19. Prikaz funkcija i različitih podloga u GIS programu (Perković, 2010)

Na temelju tih podloga mogu se provesti različite analize u GIS-u. Funkcije GIS alata su vrlo opsežne. Moguće je upravljanje i zahvaćanje prostornih podataka, analize blizine tj. mjerenje udaljenosti između pojedinih točaka npr. „Buffering“ ili zona utjecaja gdje se određuju objekti koji se nalaze na određenoj „buffer“ zoni, zatim prostorni upiti-klasifikacije parametara u razrede pod određenim kriterijima koji su zadani, Neighborhod operacije (npr nagib terena, DEM, pomoću kojeg se može odrediti otjecanje u slivu), preklapanje različitih podloga, prostorna statistika (interpolacija podataka, multiparametarske analize), sam prikaz karata (dizajn, prikaz boja), upravljanje modelima i dr. (Johnson, 2009).

Kombinacije korištenja DEM i TIN podloga u projektu daju najbolje rezultate kod određivanja hidroloških elemenata jer mogu predvidjeti kretanje onečišćenja, odrediti poplavna područja, modelirati proces otjecanja u slivu a samim time i razvodnicu, zatim model izokrona koji je značajan pri utvrđivanju realnog vremena koncentracije (Grizelj Šimić, 2014).

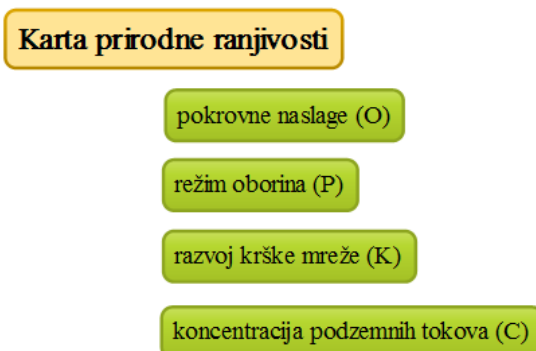
Iako je Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta istaknuta potreba obrade svih podataka GIS tehnologijom, kod toga se prije svega mislilo na prikaz prostornih podataka u svrhu korištenja kod krajnjega korisnika (Zavodi za prostorno planiranje, Hrvatske vode), a ne na dodatne analize i obrade GIS alatima za dobivanje dodatnih podataka važnih pri definiranju zaštitnih zona i mjera zaštite. Prostorna analiza GIS alatima je važan element kod projekata zaštite krških vodonosnika u regionalnom pristupu zaštiti. Prostorna analiza za potrebe zaštite krških vodonosnika višeslojna je obrada pojedinih podloga GIS baze podataka. Preklapanjem pojedinih podloga dolazi se do tri osnovna "sloja": 1. analiza prirodne ranjivosti terena 2. analiza opasnosti (hazarda) 3. analiza rizika.

Analiza ranjivosti, odnosno prirodne ranjivosti terena dodatni je alat kod izdvajanja zona sanitarne zaštite jer se njome ističu najranjivije, tj. najosjetljivije zone sliva ovisno o prirodnoj građi terena. Jedan primjer karte prirodne ranjivosti je prikazan na slici 20.



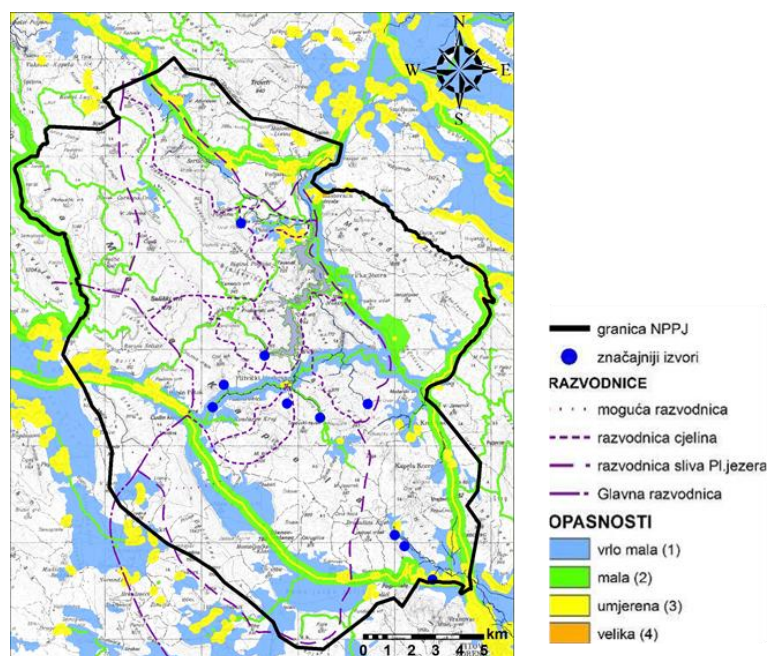
Slika 20. Primjer karte prirodne ranjivosti; sliv Bakarskog zaljeva (Biondić i sur., 2015)

Parametri kojima se definira su pokrovne naslage, režim oborina, razvoj krške mreže, koncentracija podzemnih tokova (slika 21).



Slika 21. Prikaz podloga potrebnih za dobivanje karte prirodne ranjivosti (COST 620, 2004)

Analiza opasnosti (hazarda) se klasificira prema tipu korištenja prostora što su ujedno i glavne kategorije: infrastruktura, industrija i poljoprivreda. To je zapravo baza podataka svih stvarnih i potencijalnih onečišćivača na istraživanom području. Njena vrijednost je prostorni smještaj svih onečišćivača u GIS okruženju, odnosno klasifikacija potencijalnih onečišćivača ovisno o razini opasnosti od akcidentnih situacija i neželjenih negativnih učinaka na krške vodonosnike. Primjer karte opasnosti je dan slikom 22.



Slika 22. Primjer karte klasificiranih opasnosti; područje Nacionalnog parka Plitvička jezera (Meaški, 2011)

Na temelju tih podloga radi se rangiranje i procjena težine opasnosti. Sama procjena opasnosti se radi kroz određivanje težinske ocjene, rangiranje i faktorom redukcije (slika 23). Procedura težinske ocjene (H) je glavni kriterij težinske procjene različitih opasnosti odgovarajuće tvari, a ocjenjuje se stupnjem štetnosti između 10 i 100. Procedura rangiranja (Q_n) je usporedba istog tipa opasnosti u rasponu od 0,8 do 1,2 bodova. Faktor redukcije (R_f) je procjena vjerojatnost onečišćenja podzemne vode i teoretski može biti u rasponu od 0 do 1 (COST 620, 2004).

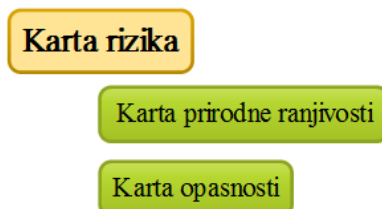


Slika 23. Prikaz podloga potrebnih za dobivanje karte opasnosti (COST 620, 2004).

Na temelju težinske vrijednosti svake opasnosti H (10 –100), faktora rangiranja Q_n (0,8-1,2) i faktora redukcije R_f (0-1) izračuna se indeks pojedine opasnosti (HI) prikazan jednadžbom (COST 620, 2004):

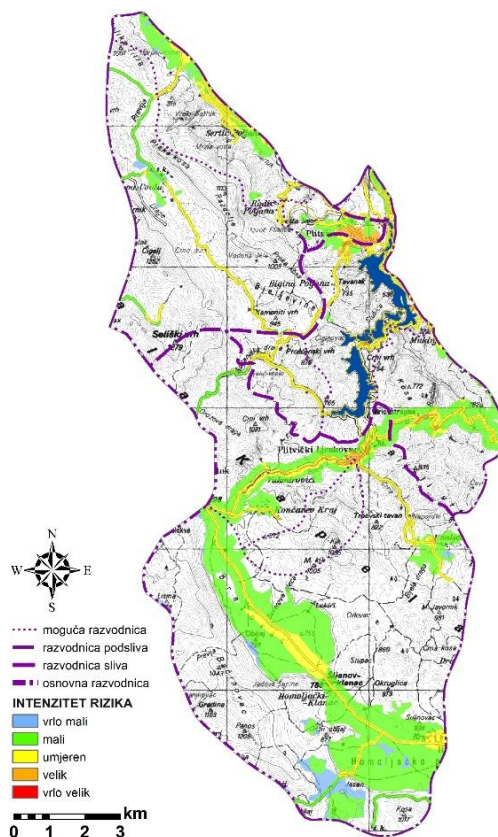
$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f$$

Karta rizika je prikaz procjene ukupnog rizika s prostornim rasporedom rizika. Najvažniji faktori su uvjeti toka (količina, brzina, smjer) biorazgradivost ili općenito kemijska sredina vode koji mogu ubrzati odlaganje. Ukupni rizik sadrži zbroj svih utjecajnih faktora rađenih kroz proceduru procjene rizika na temelju indeksa opasnosti, tj podloge karte opasnosti te indeksa prirodne ranjivosti, dakle podloge prirodne ranjivosti vodonosnika (slika 23).



Slika 24. Prikaz podloga potrebnih za dobivanje karte intenziteta rizika (COST 620, 2004)

Preklapanjem ovih podloga dobiva se karta procjene rizika koja se također može koristiti u zaštiti krških vodonosnika. Primjer karte rizika je prikazan na slici 25.



Slika 25. Primjer karte intenziteta rizika; područje Nacionalnog parka Plitvička jezera (Meaški, 2011)

Procjenom intenziteta rizika izražava se mogućnost pojave određenog štetnog događaja za vodne resurse u krškome području. Procjena intenziteta rizika u konačnici predstavlja potencijalnu stvarnu opasnost za vodne resurse (površinske i podzemne), a u skladu s prirodnim uvjetima, tipom i rasporedom mogućih onečišćivača u prostoru.

6 ZAKLJUČAK

Vodni resursi su od kritične važnosti za Republiku Hrvatsku jer održavaju naš život i život ekosustava o kojima ovisimo, zbog čega je potrebno mudro upravljanje vodnim resursima i njihov razvoj kako bi se vode zaštitile od onečišćenja.

Krški vodonosnici zbog svoje izuzetne ranjivosti zahtijevaju posebnu zaštitu. Osnovne karakteristike, koje čine krške vodonosnike visoko ranjivima su tanke i nekontinuirane pokrovne naslage, ponorne zone, jame, špilje, tokovi u epikrškim i nesaturiranim zonama vodonosnika, veliki krški izvori što rezultira relativno laganim prodorom onečišćenja u podzemlje i brzim transportom na velike udaljenosti.

Geografski informacijski sustav (GIS) je sustav za upravljanje prostornim podacima i obilježja pridruženih njima. Jedan je od najvažnijih alata za razumijevanje i donošenja odluka s problemima vezanim za upravljanje vodama. Koristi se u mnogim područjima znanosti: pedologija, upravljanje poljoprivredom, šumski i vodni resursi, urbanistički planovi, geologija, istraživanje mineralnih sirovina, katastar, monitoring okoliša. GIS se može koristiti za hidrološka istraživanja površinskih i podzemnih voda, hidrogeološka istraživanja, za sustave vodoopskrbe i navodnjavanja, sustave pročišćavanja voda, obrana od poplava, za monitoring kakvoće vode, upravljanje riječnim slivovima, korištenje zemljišta. Prilikom implementacije GIS projekta u zaštiti podzemnih voda koriste se različite baze podataka i različite podloge: karte ranjivosti, analize opasnosti.

Navedene su i opisane neke od mogućnosti primjene GIS-a vezane za zaštitu krških vodonosnika koje su na kraju svedena na dva osnovna pristupa povezana s primjenom GIS-a u zaštiti krških vodonosnika: GIS kao alat za prikaz zaštitnih zona, odnosno za projektiranje određenih sustava povezanih sa zaštitom podzemnih voda, te GIS kao alat za modeliranje ranjivosti koja se može koristiti upotrijebiti prilikom procjene zaštite podzemnih voda. Međutim, treba napomenuti kako bi se i kombinacijom ova dva osnovna pristupa vjerojatno dobila najbolja iskoristivost svih potencijala GIS-a.

7 LITERATURA

Albinet, M., Margat, J. (1970). *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine*. Bulletin BRGM 2nd Series, 3(4), 13-22.

Aller J.R., Bennet T., Feheer J.H., Petty R.J., Hackett G. (1987). *DRASTIC, a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. US EPA 600/2-87-035.

Almeida, C., Biondić, B., Hertelendi, E., Hinić, V., Morell, I. (1995). *Pollutants and Pollutant Transport in Karst Areas*. In: COST action 65 Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report, Dir-General Science, Research and Development, 371-380.

Biondić, B., Biondić R. (2014). *Hidrogeologija dinarskog krša u Hrvatskoj*. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 341 str.

Biondić, B., Biondić, R., Dukarić, F. (1998): Protection of karst aquifers in the Dinarides in Croatia, *Env. Geology*, 34(4), 309-319.

Biondić R. (2005). *Zaštita voda gornjega dijela sliva Kupe*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 171 str.

Biondić, R. (2010). *Uvod u GIS (Geografski informacijski sustav)*. Skripta iz kolegija Geografski informacijski sustav. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 114 str.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2016): *Karst aquifers vulnerability assessment (KAVA) method applied to the Bakar Bay catchment area in Croatia*. Final technical report. University of Zagreb, Faculty of geotechnical engineering, Croatia.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2014): *Vulnerability mapping of Novljanska Žrnovnica karstic spring catchment area in Croatia*. Final technical report, Faculty of geotechnical engineering, University of Zagreb, Varaždin, Croatia.

Biondić, R., Biondić, B., Rubinić, J., Meaški, H., Kapelj, S., i Tepeš, P. (2009). *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj*. Arhiv Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin.

British Geological Survey (BGS) (2016). *Groundwater*. [Online] Dostupno na: <http://www.bgs.ac.uk/products/hydrogeology/aquiferDesignation.html> [7.8.2016.]

Booth i Mitchell (2001). *Getting Started with ArcGIS*. New York: GIS by ESRI, 253 p.

Commonwealth of Kentucky (ky.gov.) (2016). *Division of Water, Groundwater Protection*. [Online]. Dostupno na: <http://water.ky.gov/groundwater/Pages/GroundwaterProtection.aspx> [14.8.2016]

COST action 620 (2004): Final report. In: Zwahlen, F. (ed): *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. European Commission, Directorate-General for Research, EUR 20912, Luxemburg, 297 p.

DCCAE Spatial Data Page. (2014). *Data Downloads*. [Online]. Dostupno na: <http://www.dccae.gov.ie/natural-resources/en-ie/Geological-Survey-of-Ireland/Pages/Data-Downloads.aspx> [3.7.2016]

DELG/EPA/GSI. (1999). *Groundwater Protection Schemes*. [Online]. Dostupno na: <https://www.gsi.ie/NR/rdonlyres/64575B4B-A06E-484C-86DC-66288B347C0C/0/groundwater.pdf> [19.8.2016].

Direktiva o podzemnim vodama (DPV) 2006/118/EC (2006). Direktiva Europskog parlamenta i Vijeća o zaštiti podzemnih voda od onečišćenja i pogoršanja kakvoće.

Doerfliger N, Zwahlen F (1995). *EPIK, a new method for outlining of protection areas: a water vulnerability assessment in karst environment*. In: Proceedings of 5th International Symposium on karst waters and environmental impacts, Antalya, Balkema, Rotterdam, 117-123.

Environmental Agency, United Kingdom (EA UK). (2009). *Groundwater Source Protection Zones – Review of Methods*. [Online]. Dostupno na: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290724/scho0309bpsf-e-e.pdf [14.7.2016.]

Environmental Protection Agency (EPA), Ireland. (2016). *Main water legislation*. [Online]. Dostupno na: <http://www.epa.ie/water/waterleg/#.VTvGZZNKUud> [14.7.2016.]

Environmental Protection Agency (EPA), Ireland. (2016). *Groundwater*. [Online]. Dostupno na: <http://www.epa.ie/water/wm/groundwater/#.VTuP9JNKUud> [14.7.2016].

Environmental Protection Agency (EPA), Ireland. (2008). *Groundwater*. Ireland's Environment [Online]. Dostupno na: <https://www.epa.ie/pubs/reports/indicators/irlenv/43366%20EPA%20report%20chap%206.pdf> [14.7.2016]

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (26.1.2016). *Displaying terrain datasets in ArcGIS*. ArcMap. [Online]. Dostupno na: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/terrains/about-displaying-terrain-datasets-in-arcgis.htm> [30.8.2016]

European Communities Environmental Objectives (Groundwater) Regulations (2010). “Iris Oifigiúil”. S.I. broj 9, Republika Irska [22.1.2010]

European Communities (Water Policy) Regulations. (2003). “Iris Oifigiúil”. S.I. broj 722, Republika Irska [22.1.2010]

Federal Waters Protection Act, WPA (1991). The Federal Assembly of the Swiss Confederation, broj 814.20, Švicarska [24.1.1991]. [Online]. Dostupno na: <https://www.admin.ch/opc/en/classified-compilation/19910022/index.html> [11.7.2016]

Federal Office for the Environment (FOEN). (29.12.2009). *Groundwater in Switzerland*, Švicarska [Online]. Dostupno na: <http://www.bafu.admin.ch/wasser/13465/13483/14972/14973/index.html?lang=en> [11.7.2016]

Federal Office for the Environment (FOEN). (2015). *Groundwater and water protection maps*, Švicarska. [Online]. Dostupno na: <http://www.bafu.admin.ch/wasser/13462/13496/15004/index.html?lang=en> [5.8.2016.]

Federal Office for the Environment (FOEN). (2015). *NAQUA National Groundwater Monitoring*, Švicarska. [Online]. Dostupno na: <http://www.bafu.admin.ch/wasser/13465/13483/14992/index.html?lang=en> [11.7.2016.]

Ford, D.C., Williams, P.W (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, UK, 562 p.

Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., Hötzl, H. (2000). *The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers*. – Z. angew. Geol., 46 (2000) 3, 157 – 166.

Grizelj Šimić V. (2014). *GIS i njegova primjena u hidrologiji i suvremenom vodnogospodarskom planiranju*. Hrvatske vode 22(88). 119-130.

Ground Water Protection Council (GWPC). (2007). *Ground Water Report to the Nation: A Call to Action*. SAD. [Online]. Dostupno na: <http://www.gwpc.org/ground-water-report-nation> [2016.]

Gunn, J. (1986). *Solute processes and karst landforms*. In: Trudgill, S. T. (ed) *Solute Processes*. Wiley, Chichester, UK, 363-437.

Hartmann, D., Meylan, B., Jordi, B. (2008). *Management des Grundwassers in der Schweiz*, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 40 p.

Huisman, O., Rolf A. de By (2001). *Principles of Geographical Information Systems*. An introductory textbook. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), The Netherlands, 540 p.

IGI (2013). *Geographic Information Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. Information Resources Management Association. USA, 2229 p.

Jurišić M., Tadić L., Dadić T. (2014). *Primjena GIS-a u gospodarenju otpadnim vodama*, Tehnički vjesnik 21(5), 1159-1163.

Johnson L. E. (2009). *GIS in water resources engineering*, Taylor & Francis Group, LLC, USA, 286 p.

Loborec, J. (2013). *Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 210 str.

Margane A. (2003). *Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in Arab Region*, Guidline for the Delineation of Groundwater Protection Zones, Federal ministry for economic cooperation and development, Damascus

Margat, J. (1968): *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution*. – BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orléans

Meaški, H. (2011). *Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka "Plitvička jezera"*. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 207 str.

Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W. M., Johnston, D., (2001). *Using Soil Erosion Modeling for Improved Conservation Planning: A GIS-based Tutorial*. [Online]. Dostupno na: http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/reports/CerlErosionTutorial/denix/Approach/DEM_modeling_erosion_at_multiple_sca.htm [15.8.2016.]

Nacrt Plana upravljanja vodnim područjima (PUVP) za razdoblje 2016.-2021. (2016). Hrvatske vode. [Online]. Dostupno na: http://www.voda.hr/sites/default/files/plan_upravljanja_vodnim_podrucjima_2016._2021.pdf [srpanj 2016.]

Okvirna direktiva o vodama (ODV) 2000/60/EC (2000): Water Framework Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy.

Perković, D. (2010). *Osnove geoinformatike. Značajke GIS-a*. Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko Geološko naftni fakultet

Philipp R., Flury, F., George, M., Kempf, T., Lutzenkirchen, V., Matousek, F., Tissieres, P., Tripet, J. P., Kozel, R., Sinreich, M. (2007). *Vulnerability of Groundwater Resources*, Hydrological Atlas of Switzerland, Bundesamt für Umwelt, Bern. [Online] Dostupno na: http://www.hades.unibe.ch/downloads/01/content/Tafel_87.pdf [17.7.2016.]

Plan upravljanja vodnim područjima (PUVP) za razdoblje 2013. – 2015. (2013), Hrvatske vode. Odluka o donošenju plana upravljanja vodnim područjima. Narodne novine. Broj 82 [26.6.2013.]

Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (2011). Narodne novine. Broj 66. [27.5.2011.]

Proleksis enciklopedija. (21.4.2015). *Švicarska*. [Online]. Dostupno na: <http://proleksis.lzmk.hr/48191/> [21.7.2016.]

Salazar Becerra M. (2011). *A Review of UK, European and International water science activity*. Imperial College London, Civil and Environmental engineering department, London

Strategija upravljanja vodama. (2008). Hrvatske vode. Narodne novine. Broj 91 [15.7.2008.]

Trček, B. (2003). Epikarst zone and the karst aquifer behavior: case study of the Hubelj catchment. Slovenia. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.

UK Groundwater Forum. *Groundwater Basics*. [Online]. Dostupno na: <http://www.groundwateruk.org/Protecting-Groundwater.aspx> [25.6.2016.]

US Environmental Protection Agency (US EPA). (1987). *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. Office of Groundwater Protection, US Environmental Protection Agency.

Vierhuff, H., Wagner, W., Aust, H. (1981). *Die Grundwasservorkommen in der Bundesrepublik Deutschland*. Geol Jahrbuch 30(C), 110 str.

Water Act (2003). The Stationery Office, broj 37, Ujedinjeno kraljevstvo [20.11.2003]

Waters Protection Ordinance, WPO. (1998). broj 814.201 [28.10.1998]

Winter T. C. i sur. (1998). *Ground water and surface water: A single resource*. U.S. Geological Survey circular 1139. Washington, D.C.: USGS.

POPIS SLIKA

Slika 1. Škocjanske jame, Slovenija (2014)	2
Slika 2. Konceptualni model krškog područja (Gunn, 1986)	4
Slika 3. Izvor Kupe	5
Slika 4. Shema zaštite podzemnih voda (DELG/EPA/GSI, 1999)	11
Slika 5. Karta ranjivosti vodonosnika u Republici Irskoj (DCCAE, 2014).....	12
Slika 6. Prikaz zone utjecaja (Zone of Contribution-ZoC) (US EPA, 1987).....	13
Slika 7. Definiranje zaštitnih zona izvorišta (DELG/EPA/GSI, 1999).....	14
Slika 8. Prikaz krških područja u UK (BGS, 2016).....	17
Slika 9. Hidrogeološka karta Švicarske (FOEN, 2015)	21
Slika 10. Karta ranjivosti vodonosnika Švicarske 2007 (Philipp R. i sur. 2007)	23
Slika 11. Zone zaštite podzemne vode (FOEN, 2015)	24
Slika 12. Pregledna karta zona sanitarne zaštite u Republici Hrvatskoj; stanje u 2012. (PUVP, 2013, 2016).....	29
Slika 13. Preklapanje tehnoloških i tradicionalnih disciplina (Biondić R., 2010).....	30
Slika 14. Primjer preklapanja slojeva (Johnson, 2009)	31
Slika 15. Primjeri DEM (Mitasova i dr., 2016) i TIN modela (ESRI, 2016)	33
Slika 16. Prirodna ranjivost vodonosnika krškog dijela (PUVP, 2013)	39
Slika 17. Prikaz strukture GIS projekta (Booth i Mitchell, 2001)	42
Slika 18. Primjer planiranja GIS projekta (DELG/EPA/GSI 1999).	43
Slika 19. Prikaz funkcija i različitih podloga u GIS programu (Perković, 2010).....	44
Slika 20. Primjer karte prirodne ranjivosti; sliv Bakarskog zaljeva (Biondić i sur., 2015)	45
Slika 21. Prikaz podloga potrebnih za dobivanje karte prirodne ranjivosti (COST 620, 2004)	46
Slika 22. Primjer karte klasificiranih opasnosti; područje Nacionalnog parka Plitvička jezera (Meaški, 2011)	46
Slika 23. Prikaz podloga potrebnih za dobivanje karte opasnosti (COST 620, 2004). ..	47
Slika 24. Prikaz podloga potrebnih za dobivanje karte intenziteta rizika (COST 620, 2004)	47
Slika 25. Primjer karte intenziteta rizika; područje Nacionalnog parka Plitvička jezera (Meaški, 2011)	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Matrica za utvrđivanje zaštitnih zona izvorišta (DELG/EPA/GSI, 1999).....	12
Tablica 2. Matrica za utvrđivanje zaštitnih zona vodonosnika (DELG/EPA/GSI, 1999)	15
Tablica 3. Kriteriji zaštite krških vodonosnika (NN 66/2011, NN 47/2013)	28